

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця  
на правах рукопису

**КОВАЛЬЧУК ОЛЕКСАНДР ГРИГОРОВИЧ**

УДК 621.745.55

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**ОСОБЛИВОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИЛИВКІВ З ДИФЕРЕНЦІЙНИМИ**  
**ВЛАСТИВОСТЯМИ ПОВЕРХНІ**

Спеціальність – 05.16.04 «Ливарне виробництво»

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ /О.Г. Ковальчук/

Науковий керівник: Ямшинський Михайло Михайлович, кандидат технічних наук, доцент

Київ – 2019

## АНОТАЦІЯ

*Ковальчук О.Г.* **Особливості виготовлення виливків з диференційними властивостями поверхні.** – Кваліфікаційна праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.04 – Ливарне виробництво (13 – Механічна інженерія).

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Київ, 2019 р.

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-прикладну проблему – розроблено наукові та технологічні засади виготовлення зносостійких і жаростійких виливків з диференційованими властивостями поверхні із сплавів на основі заліза замість традиційних технологій з використанням об'ємного легування.

Основні результати досліджень та їх наукова новизна

Розроблено новий спосіб виготовлення виливків з диференційованими властивостями поверхні легуванням металу в ливарній формі, що дало змогу замінити традиційний метод об'ємного легування, який складається з легування усього об'єму металу безпосередньо в печі чи в ковші, поверхневим, що дозволило суттєво зменшити витрати феросплавів і знизити собівартість продукції з одночасним виробництвом виливків, які працюють в екстремальних умовах абразивного, ударно-абразивного або гідроабразивного зносу.

Уперше визначено, що формування мікроструктури легованого зносостійкого шару залежить від хімічного та фракційного складу покриття, а саме використання матеріалів з низькою температурою плавлення та фракцій 02...0315. Встановлено, що температуру розплаву, яку необхідно підвищувати зі зростанням фракції легувального покриття та часу протікання дифузійних процесів на межі розділу розплаву й легувального покриття, чим більше часу протікає процес, тим буде більша товщина легованого шару.

Вдосконалено механізм формування поверхневого легованого шару виливків після нанесення на поверхню ливарної форми легувального покриття на основі

компонентів, які містять феросплави та певні хімічні елементи. Останні здатні утворювати карбіди, нітриди, бориди в поверхневому шарі.

Вперше встановлено, що незалежно від наповнювача легувальне покриття товщиною 3 мм прогрівається до максимальної температури протягом 250...350 с, що достатньо для переходу його компонентів з твердого в рідкий стан й утворення початкового легованого шару. Подальше збільшення товщини цього шару протікає внаслідок дифузійних процесів на міжфазній границі.

Установлено, що розроблений спосіб виготовлення виливків з диференційованими властивостями поверхні можна використовувати для виробництва жаростійких литих деталей, які працюють в умовах агресивних середовищ за температур до 1100 °С. При цьому показано, що збільшення маси зразка знаходиться в межах 3,0...6,0 мг/см<sup>2</sup> за 100 год.

Уперше побудовано номограми для визначення співвідношення легувальних компонентів у покритті та їх фракцій залежно від необхідної товщини легованого шару для забезпечення заданого часу експлуатації литої деталі.

Економічна ефективність використання процесу поверхневого легування під час виробництва зносостійких литих деталей замість об'ємного легування складає біля 13150 грн на одну тонну литва, а для виробництва жаростійких литих деталей замість об'ємного легування складає біля 23800 грн на одну тонну литва в цінах на 01.05.2019 року.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації та доцільність її виконання, визначено мету та задачі досліджень, об'єкт і предмет дослідження, відзначено наукову новизну роботи, її практичну значимість, наведено дані щодо апробації та публікації результатів роботи.

У першому розділі проаналізовано номенклатуру промислових литих деталей, які працюють в різних галузях в умовах високих температур, агресивних середовищ, абразивного та гідроабразивного зносу, визначено матеріали, що використовують для їх виготовлення, та основні вимоги до сплавів. Проаналізовано основні можливі технології виробництва виливків з диференційними властивос-

тями поверхні для роботи в різних умовах та визначено їх переваги та недоліки. Розглянуто особливості виготовлення виливків з використанням поверхневого легування в ливарній формі. Вибрано основні фактори, які лімітують процес розплавлення легувального покриття під час заливання ливарної форми металом. Визначено недоліки методу, серед яких є можливість нерівномірного розплавлення чи розчинення легувального покриття потоком розплаву й утворення неоднорідності структури та властивостей металу в частинах виливків, які піддаються поверхневому легуванню.

У другому розділі наведено методики дослідження спеціальних властивостей сплавів на основі заліза, описано матеріали та устаткування.

У третьому розділі викладено результати досліджень щодо вибору ефективних компонентів наповнювачів легувального покриття для виготовлення виливків із зносостійкою поверхнею в ливарній формі.

Виходячи з хімічної активності до утворення карбідів, нітридів, боридів тощо з високою твердістю, температури плавлення вихідних компонентів для легувального покриття та економічних аспектів, матеріалами для виготовлення виливків із зносостійкою поверхнею обрано феромарганець марок ФМн78А, ФМн1,5, марганець Мн965 та феротитан ФТи30А. Використано фракції наведених компонентів від 02 до 063 і товщини легувального покриття 3, 4, 5, 6, 7 мм. Температура рідкої сталі 30Л перед заливанням у ливарну форму була  $1580 \pm 10$  °С. Заливання кожної форми тривало 3...4 с.

Таким чином, для виготовлення литих зносостійких деталей з диференційованими властивостями поверхні та якісним легованим шаром товщиною до 12 мм з високою твердістю доцільно використовувати як наповнювачі легувальних покриттів окремі карбідоутворювальні хімічні елементи, їх механічні суміші та окремі хімічні сполуки.

У четвертому розділі наведено результати дослідження процесу жаростійкого поверхневого легування. Як вихідні матеріали для легувального покриття в цьому разі використовували порошки ферохрому марок ФХ800А й ФХ15А фрак-

цій 02; 0315 і 04 та алюмінію марки А85 фракцій 02; 0315; 04. Ці матеріали вибрано на підставі аналізу хімічних елементів, які найбільшою мірою сприяють підвищенню окалинотійкості сплавів на основі заліза. Марки ферохрому вибрано виходячи із температур їх плавлення: високовуглецевий ферохром ФХ800А має нижчу температуру, а низьковуглецевий ФХ015А – вищу. Температура розплаву перед заливанням форм знаходилася у межах 1600...1620 °С.

Дослідженнями окалинотійкості легованого шару встановлено, що за використання алюмінію та ферохрому в легувальному покритті окалинотійкість його майже в двадцять разів вища в порівнянні з окалинотійкістю вуглецевої сталі. Високу окалинотійкість легованого шару можна пояснити утворенням на його поверхні оксидів алюмінію  $Al_2O_3$  та хрому  $Cr_2O_3$ , які мають високу щільність і захищають поверхню виробу від проникнення до неї окиснювачів. Це підтверджує можливість і доцільність процесу поверхневого жаростійкого легування литих деталей у ливарній формі.

У п'ятому розділі наведено результати дослідження впливу рідкого скла ( $M = 2,5$ , густина  $1400 \text{ кг/м}^3$ ) і технічного лігносульфонату (ЛСТ) на процеси виготовлення легувального покриття. Як легуюче покриття використовували механічну суміш на основі феромарганцю та ферохрому фракції 0315. Для покращання змочуваності компонентів легувального покриття та зменшення шкідливого впливу на якість легованого шару ЛСТ розводили водою в співвідношенні 1:1, а рідке скло розбавляли до густини  $1200 \text{ кг/см}^3$ . Інші параметри технологічного процесу залишали без зміни.

СПЛАВ, СТАЛЬ, ЛЕГУВАЛЬНЕ ПОКРИТТЯ, ЛЕГОВАНІЙ ШАР,  
ДИФЕРЕНЦІЙОВАНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОВЕРХНІ, МІКРОЛЕГУВАННЯ,  
МОДИФІКУВАННЯ, ТВЕРДІСТЬ, ЗНОСОСТІЙКІСТЬ, ЖАРОСТІЙКІСТЬ  
ТЕХНОЛОГІЯЛИВАРНОЇФОРМИ

## SUMMARY

*Kovalchuk O.G. Features of making castings with differential surface properties* - Qualification work on the rights of the manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of the candidate of technical sciences for specialty 05.16.04 - Foundry (13 - Mechanical Engineering).

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute". Kyiv, 2019

In the dissertation the actual scientific and applied problem is solved - scientific and technological bases of production of wear-resistant and heat-resistant castings with differentiated properties of a surface from alloys on the basis of iron instead of traditional technologies with the use of bulk doping are developed.

The main research results and their scientific novelty.

A new method of manufacturing castings with differentiated surface properties of metal alloying in casting was developed, which made it possible to replace the traditional method of bulk doping, which consists of doping the entire volume of metal directly in the furnace or in a ladle, surface, which significantly reduced the cost of ferroalloys and reduce the cost of production while producing castings operating under extreme conditions of abrasive, shock-abrasive or hydroabrasive wear.

For the first time, it is determined that the formation of the microstructure of a doped wear-resistant layer depends on the chemical and fractional composition of the coating, namely the use of materials with low melting point and fractions of 02... 0315. It is established that the temperature of the melt, which should be increased with increasing fraction of the alloy coating and the time of diffusion processes at the interface of the melt and alloy coating, the longer the process flows, the greater the thickness of the alloy layer.

The mechanism of formation of surface alloyed casting layer after application of alloy coating on the foundry surface based on components containing ferroalloys and certain chemical elements has been improved. The latter are capable of forming carbides, nitrides, borides in the surface layer.

For the first time, it is found that, regardless of the filler, the alloy coating 3 mm thick warms up to a maximum temperature of 250... 350 °C, which is sufficient for the transition of its components from solid to liquid state and the formation of the initial doped layer. A further increase in the thickness of this layer occurs due to diffusion processes at the interfacial boundary.

It is established that the developed method of making castings with different surface properties can be used for the production of heat-resistant cast parts that operate in aggressive environments at temperatures up to 1100 °C. It is shown that the increase in sample weight is in the range of 3.0... 6.0 mg / cm<sup>2</sup> for 100 h.

Nomograms were first constructed to determine the ratio of alloying components in the coating and their fractions, depending on the required thickness of the alloyed layer to provide a predetermined operating time of the cast part.

The cost-effectiveness of using the surface alloying process in the production of wear-resistant cast parts instead of bulk doping is about UAH 13150 per tonne of casting in 2019 prices and for the production of heat-resistant casting parts instead of bulk doping is about UAH 23800 per ton of casting in prices 2019.

The introduction substantiates the relevance of the topic of the dissertation and the feasibility of its completion, defines the purpose and tasks of the research, the object and subject of the research, notes the scientific novelty of the work, its practical importance, presents data on the approbation and publication of the results of the work.

The first section analyzes the nomenclature of industrial cast parts operating in various industries in high temperature, corrosive environments, abrasive and hydroabrasive wear, identifies the materials used for their manufacture, and basic requirements for alloys. The main possible technologies for the production of castings with differential surface properties for operation in different conditions have been analyzed and their advantages and disadvantages have been determined. The peculiarities of casting production using surface alloying in casting are considered. The main factors that limit the process of melting of the alloy coating during casting of the casting metal are selected. The disadvantages of the method are identified, among which there is a possibility of irregularly melting or dissolving the alloy coating with the melt

flow and the formation of heterogeneity of the structure and properties of metal in the parts of castings that are subject to surface alloying.

The second section describes the methods of investigation of foundry, mechanical and special properties of iron-based alloys, describes the materials and equipment used.

The third section presents the results of studies on the selection of effective components of alloys fillers for the manufacture of castings with a wear-resistant surface in foundry.

Based on the chemical activity before the formation of carbides, nitrides, borides, etc. with high hardness, melting point of the original components for alloying coating and economic aspects, materials for the manufacture of castings with a durable surface are selected ferromagnetic brands FMn78A, FMn165, manganese Mn3065. The fractions of the above components from 02 to 063 and the thickness of the alloy coating of 3, 4, 5, 6, 7 mm were used. The temperature of the 30L liquid steel before casting was  $1580 \pm 10$  °C. Filling each form lasted 3... 4 sec.

Thus, for the manufacture of cast wear resistant parts with different surface properties and high quality alloyed layer up to 12 mm thick with high hardness, it is advisable to use as carbide fillers individual carbide chemical elements, their mechanical mixtures and separate chemical compounds.

The fourth section presents the results of the study of the process of heat-resistant surface alloying. In this case, the starting materials for the alloying coating were the powders of ferrochrome grades FX800A and FX15A of 0,2 mm fractions; 0315 and 04 and aluminum grade A85 fractions 02; 0315; 0,4. These materials are selected on the basis of the analysis of the chemical elements that are most conducive to increasing the hardness of iron-based alloys. Ferrochromic grades are chosen based on their melting point: the high carbon ferrochrome FX800A has a lower temperature and the low carbon FX015A - higher. The melt temperature before casting was within 1620 °C.

Investigations of the hardness of the alloyed layer have shown that with the use of aluminum and ferrochrome in the alloy coating, the hardness is almost twenty times higher than the hardness of carbon steel. The high stiffness of the doped layer can be



explained by the formation on its surface of aluminum oxides  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and chromium  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , which have a high density and protect the surface of the product from penetration of oxidizing agents. This confirms the possibility and feasibility of the process of surface heat-resistant alloying of cast parts in casting.

Section 5 presents the results of a study of the effect of liquid glass ( $M = 2,5$ , density  $1400 \text{ kg / m}^3$ ) and technical lignosulfonate (LST) on the processes of alloy coating production. A mechanical mixture based on ferromanganese and ferrochromium fraction of 0315 was used as the alloy coating. To improve the wettability of the components of the alloy coating and reduce the adverse effect on the quality of the doped layer LST was diluted with water in a ratio of 1:1, and the liquid glass was diluted to a density of  $1200 \text{ kg / m}^3$ . Other process parameters were left unchanged.

ALLOY, STEEL, ALLOY COVER, ALLOY BALL, DIFFERENTIATED PROPERTIES OF SURFACE, MICRO-ALLOYING, MODIFICATION, RELIABILITY, RELIABILITY.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

### **в яких опубліковано основні наукові результати дисертації**

1. Ковальчук А. Г., Ямшинский М. М., Федоров Г. Е. Исследование процессов жаростойкого поверхностного легирования отливок // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. № 2 (41), 2017. С. 44...50.

2. A.G. Kovalchuk, M.M. Yamshinskij, G.E. Fedorov, N.V. Yamshinska Differentiated Properties of Metal Products' Surface // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) Vol. 6 Issue 10, October – 2017 pp. 186...194.

3. Ковальчук А.Г., Ямшинський М.М., Федоров Г.Е. Исследование процессов износостойкого поверхностного легирования // Метал и литье Украины №6-7 (289-290), 2017, С. 28-34.

4. Ковальчук А.Г., Ямшинський М.М., Федоров Г.Е. Усовершенствование технологических процессов поверхностного легирования заготовок в литейной форме // Метал и литье Украины №8-10 (291-293), 2017, С. 55-63.

5. Ковальчук А.Г., Ямшинський М.М., Федоров Г.Е. Виробництво виливків з диференційованими властивостями поверхні // Наукові вісті НТУУ «КПІ» №6, 2017. С. 74...80 DOI: 10.20535/1810-05 46.2017.6.98850.

6. Ковальчук А.Г., Ямшинский М.М., Федоров Г.Е. Физико-химические процессы в отливках при износостойком поверхностном легировании поверхности // Метал и литье Украины №9-10, 2018, С. 38...45.

### **які засвідчують апробацію основних матеріалів дисертації**

7. Ковальчук О.Г., Ямшинський М.М., Федоров Г.Є. Поверхневе легування // Web of Scholar. Multidisciplinary Scientific Journal 6(6), October 2016. P. 23...25.

8. Ковальчук О.Г., Ямшинський М.М., Федоров Г.Є.. Методологія поверхневого легування сталевих виливків. Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра, 2016. С. 556...561.

9. Ковальчук О.Г., Ямшинський М.М. Поверхневе легування сталевих виливків // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези

доповідей XXIV міжнародної науково-практичної конференції, Ч.I (18-20 травня 2016р., Харків) – Харків, НТУ «ХП».

10. Ковальчук О.Г., Ямшинський М.М., Федоров Г.Є. Поверхнєве легування сталевих виливків. Литве. Metallurgiya 2016, 24...26.05.2016 г. Запорожье, С. 119...121.

11. Ковальчук О.Г., Ямшинський М.М., Федоров Г.Є. Поверхнєве легування сталевих виливків // VIII Міжнародна науково-технічна конференція. Нові матеріали і технології в машинобудуванні: матеріали науково-технічної конференції, 30...31 травня 2016 р., м. Київ, 2016. С. 78...79.

12. Ковальчук О.Г., Ямшинський М.М., Федоров Г.Є. Виливки з диференційними властивостями поверхні // IX Міжнародна науково-технічна конференція. Нові матеріали і технології в машинобудуванні, 30...31 травня 2017 р., м. Київ, 2017. С. 65...69.

13. Ковальчук О.Г., Ямшинський М.М., Федоров Г.Є. Отримання виливків з диференційними властивостями поверхні // XIII Міжнародна науково-практична конференція. Литве. Metallurgiya, 23...25.05.2017 г. Запорожье, С. 133...135.

14. Ковальчук А. Г., Ямшинский М. М., Федоров Г. Е. Исследование процессов жаростойкого поверхностного легирования отливок // VI Міжнародна науково-технічна конференція «Перспективні технології, матеріали і обладнання у ливарному виробництві», 25–28 вересня 2017 року, м. Краматорськ. С. 71...73.

15. Ковальчук А.Г., Ямшинский М.М., Федоров Г.Е. Жаростойкое поверхностное легирование отливок // X Міжнародна науково-технічна конференція. Нові матеріали і технології в машинобудуванні. 24...25 квітня 2018 р., м. Київ. С. 84...87.

16. Ковальчук О.Г., Ямшинський М.М., Федоров Г.Є. Виливки із диференційованими властивостями поверхні // XIV Міжнародна науково-практична конференція. Литве. Metallurgiya 2018., 22...24.05.2018 г. Запорожье. С. 113...215.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	16
РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ .....	22
1.1 Промислові зносостійкі та жаростійкі сплави й вимоги, що до них пред'являють .....	22
1.1.1 Середньовуглецеві зносостійкі сталі.....	22
1.1.2 Високовуглецеві сталі.....	24
1.1.3 Високомарганцеві сталі .....	25
1.1.4 Зносостійкі чавуни .....	28
1.1.5 Хромисті жаростійкі сталі .....	29
1.1.6 Хромоалюмінієві сталі.....	31
1.2 Вплив легувальних елементів на зносостійкість сплавів на основі заліза ....	34
1.3 Вплив легувальних елементів на жаростійкість сплавів на основі заліза .....	37
1.4 Процеси розчинення феросплавів в рідкому металі .....	42
1.5 Методи виготовлення виливків з диференційованими властивостями поверхні і окремих частин литої заготовки .....	47
1.6 Поверхнєве легування як метод одержання виливків з диференційованими властивостями поверхні .....	52
1.6.1 Механізм поверхневого легування.....	52
1.6.2 Технологія поверхневого легування .....	61
1.6.3 Кінетика поверхневого легування та її різновиди .....	64
1.7 Висновки і постановка завдання досліджень.....	69
РОЗДІЛ 2	
МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ.....	71
2.1 Вихідні матеріали для виготовлення виливків методом поверхневого легування.....	71

	13
2.2 Виплавлення основного сплаву .....	72
2.3 Розроблення зразків для дослідження процесів поверхневого легування .....	72
2.4 Технологія нанесення легувального покриття .....	80
2.5 Дослідження температури .....	81
2.6 Вивчення абразивної зносостійкості.....	82
2.7 Дослідження твердості зразків, товщини легувального шару та структури ..	83
2.8 Методика дослідження процесів структуроутворення в сталях.....	83
2.9 Методики визначення спеціальних властивостей сплавів.....	86
2.10 Забезпечення точності вимірювань та адекватності математичних моделей.....	88
2.11 Висновки до розділу .....	90
<b>РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИЛИВКІВ ІЗ ЗНОСОСТІЙКИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ ПОВЕРХНІ.....</b>	<b>91</b>
3.1 Дослідження процесів поверхневого легування при використанні окремих феросплавів .....	91
3.2 Дослідження процесів поверхневого легування з використанням механічних сумішей феросплавів .....	100
3.3 Дослідження процесів поверхневого легування з використанням сполук легувальних елементів .....	107
3.4 Дослідження технологічних процесів поверхневого легування.....	108
3.5 Висновки до розділу.....	111
<b>РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЖАРОСТІЙКОГО ПОВЕРХНЕВОГО ЛЕГУВАННЯ ВИЛИВКІВ .....</b>	<b>112</b>
4.1. Дослідження процесу поверхневого жаростійкого легування порошками окремих компонентів.....	112
4.2. Поверхневе легування із застосуванням легуючого покриття на основі лігатури хром-алюміній-залізо.....	123
4.3 Висновки до розділу.....	127
<b>РОЗДІЛ 5 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗВ'ЯЗУВАЛЬНОГО КОМПОНЕНТУ ....</b>	<b>128</b>

	14
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	132
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	133
ДОДАТОК А Акт впровадження.....	141
ДОДАТОК Б Розпилювач для нанесення фарби .....	142

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ**

ІСТ – індукційна сталеплавильна піч

ФМн – феромарганець

ФТи – феротитан

ФБ – феробор

ФХ – ферохром

РЗМ – рідкісноземельні метали

HRA – твердість за Роквеллом, шкала А

HRB – твердість за Роквеллом, шкала В

HRC – твердість за Роквеллом, шкала С

HB – твердість за Бринеллем

## ВСТУП

**Актуальність роботи:** Аналізом експлуатації литих деталей, які працюють в умовах інтенсивного зносу, високих температур та агресивних середовищ (теплоенергетика, металургія, гірничозбагачувальна й хімічна галузі тощо) встановлено, що технології їх виготовлення з використанням об'ємного легування металу себе не виправдовують, а в багатьох випадках є шкідливими, оскільки лише невелика товщина таких деталей зношується, окиснюється або пошкоджується. Це призводить до невиправданих витрат дорогих високолегованих сплавів. Наприклад, утрати металу високої вартості під час вироблення електроенергії тепловими електростанціями України, який щорічно втрачається безповоротно, вимірюються тисячами тонн.

Для досягнення високої поверхневої міцності та зносостійкості литих деталей в машинобудуванні використовують різні види оброблення: термічне, хіміко-термічне, лазерне, електрохімічне тощо. Проте цими методами не вдається одержати шар металу з потрібними властивостями товщиною понад 0,3 мм, що недостатньо, особливо для тривалої експлуатації великих деталей в умовах інтенсивного зносу чи високих температур. Практикою встановлено, що товщина поверхневого шару із спеціальними властивостями має бути не менше 5...10 мм. Наплавленням на поверхні деталі можна одержати шар такої товщини, але цей процес дуже трудомісткий, дорогий і, крім того, на важкодоступних поверхнях деталей наплавлення металу здійснити практично неможливо.

Для вирішення проблеми утворення поверхневого зносостійкого або жаростійкого шару необхідної товщини перспективним може бути спосіб виробництва виливків із нелегованих сплавів на основі заліза з поверхневим композиційним або легованим шаром, який утворюється під час формування виливка в ливарній формі, а також виготовлення біметалевих виливків з використанням внутрішньо-формового модифікування або легуванням і суспензійним розливанням сплавів.

До хімічного складу, мікроструктури, фізичних і механічних властивостей сплавів, які використовують для виготовлення таких деталей, висувають особливі вимоги щодо стійкості в абразивних середовищах, а саме: підвищений вміст хрому чи марганцю, наявність стійких карбідів у міцній перлітній або мартенситній



металевій матриці, відповідність мікроструктури правилу Шарпі, максимальна мікротвердість, корозійна стійкість тощо. У той же час до іншої матричної частини деталі, яка не контактує з абразивом або агресивним високотемпературним середовищем, можуть висуватись протилежні вимоги, а саме: відсутність карбідоутворювальних хімічних елементів, м'яка в'язко-пластична ударостійка феритна або аустенітна металева матриця тощо. Виходячи з умов експлуатації, такі деталі машин і механізмів мають бути з диференційними властивостями окремих частин. Очевидно, що найкращим варіантом промислового виготовлення таких литих деталей мають бути технології поверхневого легування після чіткого установаження теоретичних і технологічних основ таких процесів.

Отже, дисертаційна робота, яку спрямовано на розроблення теоретичних і технологічних основ диференціації властивостей поверхні виливка методами поверхневого внутрішньоформового легування та модифікування сплавів на основі заліза є актуальною.

**Об'єкт дослідження:** процеси і технології виготовлення виливків з диференційними властивостями поверхні для роботи в екстремальних умовах легуванням металу в ливарній формі.

**Предмет дослідження:** взаємодія розплаву з компонентами легувального покриття, кристалізація та структура металу легованого шару, його твердість, зносостійкість і жаростійкість.

**Мета дослідження:** розроблення наукових і технологічних принципів диференціації спеціальних властивостей металу у виливках відповідального та особливо відповідального призначення з підвищенням експлуатаційної надійності та довговічності роботи машин і механізмів.

**Завдання дослідження.** Для досягнення поставленої мети в роботі сформульовано такі наукові та практичні завдання:

1. Розробити методики дослідження процесів поверхневого легування та виготовлення виливків із диференційними спеціальними властивостями поверхні, зокрема, із високими зносостійкістю та окалинотійкістю.

2. Науково обґрунтувати й вибрати хімічні елементи для зносостійкого та жаростійкого поверхневого легування виливків у ливарній формі.

3. Вивчити вплив гранулометричного складу наповнювача легувального покриття на процеси утворення й товщину легованого шару та визначити оптимальні межі легувальних компонентів.

4. Дослідити зміну структури, твердості металу та мікротвердості структурних складових легованого шару залежно від хімічного та гранулометричного складу наповнювачів для зносостійкого й жаростійкого поверхневого легування.

5. Визначити оптимальний хімічний й гранулометричний склад наповнювачів й зв'язувальних компонентів для зносостійкого й жаростійкого легування виливків.

6. Розробити технологічні процеси та інструкції для виготовлення виливків з потрібними диференційними спеціальними властивостями поверхні.

7. Запропонувати конкретні рекомендації щодо особливостей виготовлення виливків з диференційними властивостями поверхні у виробничих умовах.

**Методи дослідження.** Мета й поставлені в роботі задачі обумовили проведення комплексних теоретичних й експериментальних досліджень процесу поверхневого легування виливків з використанням сучасних методів та устаткування для визначення, структури, твердості легованого металу та мікротвердості його складових з високими достовірністю й відтворюваністю результатів. Металографічні дослідження виконано на мікроскопах MIM-8, NEOFOT-21, PEM-106I та Axio Vert.A1 (Carl Zeiss). Фазовий склад легувальних покриттів визначено на дифрактометрах Ultima IV та ДРОН-2.0.

### **Наукова новизна одержаних результатів**

Наукову новизну складають наведені нижче результати теоретичних та експериментальних досліджень: запропоновано новий спосіб отримання виливків з заданим хімічним складом, структурою та властивостями. Все це дало змогу розробити нову технологію виготовлення виливків з робочою частиною із заданим хімічним складом і основою – сталь 30Л.

1. Удосконалено спосіб виготовлення виливків з диференційними властивостями поверхні легуванням металу в ливарній формі, що дає змогу замінити традиційний метод об'ємного легування металу в печі або в ковші поверхневим. Це в декілька разів зменшує витрати дорогих феросплавів і, як наслідок, знижує собівартість продукції з одночасним підвищенням терміну експлуатації литих дета-

лей в екстремальних умовах абразивного, ударно-абразивного або гідроабразивного зношування та високих температур й агресивних середовищ.

2. Уперше визначено, що формування товщини та мікроструктури легованого зносостійкого чи жаростійкого шару залежить від хімічного та фракційного складу компонентів легувального покриття, температури їх плавлення та температури розплаву, що заливається у форму. Установлено, що використання компонентів з температурою плавлення нижчою температури розплаву та фракцій 02...0315 є головними технологічними факторами для формування якісного легованого шару необхідної товщини.

3. Встановлено закономірності формування мікроструктури в перехідній зоні між основним металом вилівка й легованим шаром. Це дає змогу чітко визначити властивості та ступінь утримування легованого шару на поверхні виробу й оцінити його експлуатаційну надійність.

4. Визначено механізм формування поверхневого шару після нанесення на поверхню ливарної форми покриття на основі компонентів, які вміщують феросплави, хімічні сполуки різного складу та окремі хімічні елементи. Це дало змогу їх використовувати для виготовлення литих деталей з диференційованими властивостями.

5. Уперше встановлено, що незалежно від наповнювача легувальне покриття товщиною 3 мм прогрівається до максимальної температури протягом 250...350 с, що достатньо для розплавлення або розчинення його компонентів з одночасним утворенням легованого шару. За умови збільшення товщини легувального покриття остаточне формування легованого шару відбувається в результаті протікання дифузійних процесів на межі розділу основа – легувальне покриття.

6. Показано, що розроблений спосіб дає змогу виготовляти жаростійкі литі деталі для роботи в умовах агресивних газових середовищ за температур до 1100 °С, оскільки за такої температури збільшення маси деталі не перевищує 3,0...6,0 мг/см<sup>2</sup> за 100 год.

7. Уперше встановлені залежності у вигляді номограм для визначення співвідношення компонентів у легувальному покритті та їх фракцій залежно від необхідної товщини легованого шару та часу експлуатації литої деталі.

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові положення дисертаційної роботи, що виносяться на захист, сформульовано автором особисто. Складено огляд літератури за темою дисертаційної роботи, зроблено відповідні висновки, сформульовано мету та основні задачі дослідження. Послідовним виконанням серії експериментальних і промислових досліджень автором визначено особливості перспективного конструктивно-технологічного варіанта виробництва сталевих виливків з диференційними властивостями поверхні.

Автором виконано комп'ютерне моделювання гідродинамічних процесів, що відбуваються під час виготовлення виливків з диференційними властивостями поверхні. Установлено закономірності впливу основних технологічних параметрів вихідної товщини насипного шару легувальних елементів та температури заливання сталі на структуру та властивості виливків. Обговорення результатів досліджень, формулювання основних висновків і рекомендацій за темою роботи виконано здобувачем спільно з науковим керівником.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати, що викладено в дисертації, апробовано на конференціях: XXIV міжнародній науково-практичній конференції: Наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: (18-20 травня 2016р., Харків); Міжнародній конференції «Web of Scholar. Multidisciplinary Scientific Journal 6(6), October 2016»; Міжнародній конференції «Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра», Київ, 2016; XII Міжнародній науково-практичній конференції «Литьє. Металлургия 2016» 24-26 травня 2016 р., м. Запоріжжя; IX Міжнародній науково-технічній конференції «Нові матеріали і технології в машинобудуванні», м. Київ, 30-31 травня 2017 р.; XIII Міжнародній науково-практичній конференції «Литьє. Металлургия 2017», 23-25 травня 2017 р. м. Запоріжжя; VI Міжнародній науково-технічній конференції «Перспективні технології, матеріали та обладнання в ливарному виробництві», 25–28 вересня 2017 р., м. Краматорськ; X Міжнародній науково-технічній конференції «Нові матеріали і технології в машинобудуванні», м. Київ 24-25 квітня 2018 р.; XIV Міжнародній науково-практичній конференції «Литьє. Металлургия 2018», 22-24 травня 2018 р. м. Запоріжжя.

Дисертаційна робота доповідалася на кафедрі ливарного виробництва чорних і кольорових металів НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» (Київ, 2019 р.).

**Публікації.** Основні положення дисертаційної роботи викладено в 6 наукових працях, з яких 5 статей у наукових фахових виданнях, з них 1 стаття у виданні

іноземної держави, та в 10 тезах доповідей в збірниках матеріалів Міжнародних конференцій.

**Структура та обсяг дисертаційної роботи.** Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел із 105 найменувань і 2 додатків. Основну частину дисертації викладено на 140 сторінках, вона вміщує 50 рисунків, 16 таблиць. Загальний обсяг роботи 142 сторінок.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами**

Робота мала зв'язок з темами, які виконувалися в 2014...2018 р: №2632п «Розроблення методології прогнозування структури і властивостей металу у виливках із сплавів на основі заліза з високим вмістом хрому» (номер держреєстрації 0113U000649), наказ Міністерства освіти і науки України від 25.10.12 р. №1193 (2013...2014 р.); №2851п «Технологічні особливості прогнозування властивостей розплавів і структури металу виливків для роботи в екстремальних умовах» (номер держреєстрації 0115U000406), наказ Міністерства освіти і науки України від 31.10.14 р. №1243 (2015...2016 р.); ініціативна робота кафедри «Технології виготовлення зносостійких і жаростійких виливків з диференційованими властивостями поверхні легуванням у ливарній формі».

**Практичне значення одержаних результатів.** За результатами виконаних досліджень:

1. Розроблено новий спосіб та технології виготовлення виливків з диференційними властивостями поверхні для роботи в екстремальних умовах з використанням внутрішньоформового легування.

2. Установлено вплив основних технологічних параметрів процесу на формування якісної структури та властивостей легованого шару, а саме: вихідної товщини легувального покриття, гранулометричного складу його компонентів і температури розплаву вихідної сталі, що заливається в ливарну форму.

3. Вивчено в комплексі фізичні та експлуатаційні характеристики виливків. Одержані результати дали підстави для використання литих жаростійких та зносостійких виробів із цих сплавів.

4. Розроблено технології виготовлення якісних виливків з леговою поверхнею: визначено склад сумішей та гранулометричний склад легувальних покриттів, оптимальні температури розплаву перед заливанням його у форми залежно від товщини стінок виливка та його габаритних розмірів. Це дало можливість вперше отримати легований шар товщиною до 12 мм.

## РОЗДІЛ 1

## СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

**1.1 Промислові зносостійкі та жаростійкі сплави й вимоги, що до них висувають****1.1.1 Середньовуглецеві зносостійкі сталі**

Середньовуглецеві сталі використовують для виготовлення зносостійких деталей з високою міцністю. Для цієї групи сталей притаманною особливістю є подвійне термічне оброблення: гартування з подальшим відпуском, що підвищує собівартість виробів.

Загальні середньовуглецеві леговані сталі, які можна використовувати для виготовлення зносостійких деталей наведені в таблиці 1.1 [1, 2]. Першочергове практичне значення представляють сталі, леговані хромом, цирконієм, титаном, ванадієм і бором (див. сплави 1, 2, 3 і 4, табл.1.1), які, після гартування від 870...910 °С і відпуску при 200 °С, незважаючи на відносно низький вміст вуглецю, мають мартенситну структуру з твердістю 55...60 HRC та ударну в'язкість – 0,5...0,6 МДж/м<sup>2</sup>. Ці сталі можуть бути використані для виготовлення деталей, які працюють в абразивному середовищі з невеликими ударними навантаженнями, наприклад, лопаток дробометів тощо, а також використовують для виготовлення траків для гусениць бронемашин і іншої техніки на гусеничному ході.

Для ряду деталей доцільно використовувати сталь 50С2ХЮТЛ, вона має високу зносостійкість в такому абразивному середовищі як пісок. Ця сталь піддається гартуванню з 940 °С в оливі, а при підвищенні температури відпуску від 110 °С до 640 °С її твердість змінюється від 64,0 до 31,5 HRC, ударна в'язкість, відповідно, від 0,14 до 0,52 МДж/м<sup>2</sup>.

В умовах абразивного зношування добре зарекомендувала себе сталь 50ДФТЮЛ (див. сплав 7, табл.1.1) після нормалізації від температури 840...880 °С.

Зносостійкість цієї сталі в 1,5 рази вища, незважаючи на невисоку твердість, яка складає всього 245 НВ, ніж сталі 110Г13Л, [3]. Таке невисоке значення твердості дозволяє рекомендувати сталь для виробництва виливків, що працюють в умовах інтенсивного зношування і ударних навантаж.

Загалом, основним недоліком середньовуглецевих зносостійких сталей є складний режим термічного оброблення: гартування в оліві і відпуск, який не завжди є оптимальним в умовах діючих виробництв.

Таблиця 1.1

Хімічний склад зносостійких середньовуглецевих легованих сталей [4]

Індекс позиції	Країна	Рік	Номер патента (a/c)	Хімічний склад, %					
				C	Si	Mn	Cr	V	Інші елементи
1	2		3	4	5	6	7	8	9
1	СНД	1968	20827 7	0,17... 0,23	1,40... 0,23	1,0... 1,40	1,50... 1,80	-	0,05...0,10 Zr
2	Велико-британія	1982	13779 14	0,24... 0,30	0,15... 0,30	1,80.. 2,50	-	-	0,05...0,50 Cu; 0,50...1,25 Ni ; 0,10...0,30 Nb
3	Велико-британія	1920	13604 83	0,30... 0,60	0,10... 0,50	0,50.. 1,50	0,75... 1,50	0,50	0,005 В ; 0,10...1,50 Mo;0,10... 0,20 Ti
4	СНД	1993	19941 0	0,35... 0,45	1,20... 1,50	1,0... 1,50	1,20... 1,50	0,15... 0,25	-
5	СНД	1963	16518 5	0,45... 0,55	1,0...2, 0	0,30.. 0,80	0,90... 1,50	0,10... 0,20	-
6	Японія	1997	44597 0	0,40... 0,60	1,80... 2,60	1,20	3,0	-	0,10...0,50 Al
7	СНД	1975	46197 1	0,45... 0,55	0,50... 1,00	0,50.. 0,80	-	0,05... 0,15	0,80...1,20 Cu; 0,05... 0,15 Ti; 0,07... 02 Al
8	Японія	1990	48142 85	0,50... 0,60	1,50... 2,50	0,40	-	-	0,10...0,40 Mo

Крім вище зазначеного дані сталі мають відносно низьку ударну в'язкість (до 0,50 МДж/м<sup>2</sup>). Внаслідок високотемпературного відпуску, що призводить до підвищення в'язкості, додатково відбувається зниження твердості поверхні виробу, а разом з нею і його зносостійкості.

Проаналізувавши табл. 1.1 можна зробити висновок, що використання даних марок сталей для виготовлення виливків відповідального призначення об'ємним легуванням потребує використання дорогих та дефіцитних елементів [4].

### 1.1.2 Високовуглецеві сталі

На відміну від середньовуглецевих сталей мартенситного класу, в яких в структурі майже відсутні вільні карбіди, в групі сталей з високим вмістом вуглецю вторинні карбіди є головним структурним компонентом, який чинить опір зношуванню виробу.

Як і сталі мартенситного класу, всі високовуглецеві леговані сталі потребують гартування з відпуском, оскільки в литому стані вони крихкі. Основними легувальними елементами в цій групі сталей є хром і марганець. Крім цих елементів в сталі додають незначну кількість нікелю, ванадію, молібдену, титану, ніобію та ін.. Оптимальні поєднання властивостей має сталь 70ХНЛ, яка після гартування з  $860 \pm 10$  °С і відпуску при  $180 \pm 10$  °С має наступні показники механічних властивостей:  $\sigma_b \geq 275$  МПа;  $\sigma_t \geq 175$  МПа;  $\delta \geq 8$  %;  $\psi \geq 18$  %;  $KCU \geq 0,32$  МДж/м<sup>2</sup>,  $HRC \geq 60$  од. [5].

Вироби із цієї сталі можуть працювати як при відсутності ударів, так і при наявності помірних динамічних навантаж.

Недоліком сталі є наявність в ній дефіцитного нікелю. Цей елемент входить до складу деяких інших марок високовуглецевих сталей, що помітно стримує їх використання в промисловості [4].

Із простих і доступних сталей слід відзначити сталь марки 80Г6ХЗФЛ, яка в умовах помірних ударних навантаж має відносно високу зносостійкість у порів-



нянні з іншими високовуглецевими мартенситно-карбідними сталями. Характерні властивості має і складнолегована сталь 110Г13Д10МФА, яка, за даними а.с. СРСР №503937, після гартування від 1150 °С і відпуску при 550 °С поєднує в собі відносно високу ударну в'язкість (більше 3,0 МДж/м<sup>2</sup>) і дуже високу зносостійкість (2,18 МДж/м<sup>2</sup> у порівнянні з промисловим варіантом сталі 110Г13Л) [6].

Про можливість використання високовуглецевих низьколегованих сталей для зносостійких виливків свідчить той факт, що їх, як показує аналіз, літературних джерел, достатньо широко використовують для виготовлення литих деталей броньованого устаткування аглофабрик на заводах чорної металургії (табл. 1.2). Ці сталі показали високі результати при випробуванні футеровки кульових млинів Алексинської ТЕЦ, як свідчать роботи ЦНДІВМаш (табл. 1.3) [6].

Високовуглецеві зносостійкі сталі можна використовувати для виготовлення литих деталей для розмелювального устаткування, проте необхідно враховувати конкретні умови експлуатації: особлива увага приділяється наявності ударних навантажень.

### **1.1.3 Високомарганцеві сталі**

Незважаючи на достатньо високу якість різних промислових сплавів, сьогодні найбільш широко використовують для виготовлення литих деталей дробильно-розмелювального устаткування сталь 110Г13Л. Ця сталь характеризується високою ударною в'язкістю після гартування і найбільшою серед усіх відомих марок сталей зносостійкістю в умовах ударної дії абразиву із-за оригінальної здібності сталі мати високу поверхневу твердість внаслідок її наклепування. Сутність наклепу – перехід аустеніту в мартенсит під дією ударних навантаж [7].

Хімічний склад сталі 110Г13Л коливається в досить широких межах: вуглець – від 0,9 до 1,5%; марганець – від 11,5 до 15,0%; кремній – до 1,0%; фосфор – до 0,12%; сірка – до 0,05%.

Допустима найбільша кількість хрому і нікелю, до 1% кожного.

Більшість нормативних документів обумовлюють відношення марганцю до вуглецю 10:1 [8, 9].

Таблиця 1.2

Використання високовуглецевих сталей для виготовлення броні кульових млинів на підприємствах гірничо-металургійного комплексу України [4]

Найменування металургійного заводу	Матеріал для виготовлення броні
Запоріжсталь	70 ХЛ
Дніпродзержинський металургійний завод	50 Х2 Л
Єнакіївський металургійний завод	70 ХЛ
Макіївський металургійний завод	70 ХЛ
Комунарський металургійний завод	110 Г13Л
Ново-Криворізький завод	70 ХЛ
Криворізький металургійний завод	70 ХЛ

Таблиця 1.3

Марки та основні показники роботи броні плит із високовуглецевих сталей на Алексинській ТЕЦ [4]

Марка сталі	Ударна в'язкість, КСУ, МДж/м <sup>2</sup>	Відносна зносостійкість
110Г13Л	≥ 1,5	1,00
70Х2Г2С2Л	≥ 0,4	1,20
70Х2Г2С2ВЛ	≥ 0,4	1,20
200Х2	≥ 0,4	1,15
100ГЛ	≥ 0,6	1,50
У12Л	-	0,99

Як вже відзначалось, підвищена здатність до зміцнення марганцевого аустеніту пов'язана з його перетворенням під час пластичної деформації в мартенситну структуру. Чим менше стабільний аустеніт марганцевої сталі, тим більше проявляється його схильність до зміцнення [10].

Після наклепування зносостійкість сплаву визначається опором до стирання поверхневого мартенситного або подібного до нього шару. Особливістю залізо-марганцевого аустеніту (основи сталі 110Г13Л) є утворення в ньому під час

деформації одночасно з класичним мартенситом подібної йому  $\varepsilon$ -фази, яка краще зміцнюється під час ударної взаємодії, ніж аустеніт [11].

Висока дисперсність і рівномірна розосередженість утвореного мартенситу визначається аустенітним зерном сталі 110Г13Л і забезпечує однакове зношування поверхні виробу в різних місцях. Зношений абразивом наклепаний шар оголює новий, в якому знову утворюється під час ударів мартенситна зносостійка структура. Процес повторюється і відтворюється безліч разів, в результаті чого зношування виробу здійснюється дуже повільно.

В той же час, властивості сталі 110Г13Л досить нестабільні і сильно змінюються залежно від конкретного вмісту хімічних елементів і технології виплавлення.

Зносостійкість сталі 110Г13Л, виплавленої за різними технологіями, може відрізнятись в 2...3 рази [12...14].

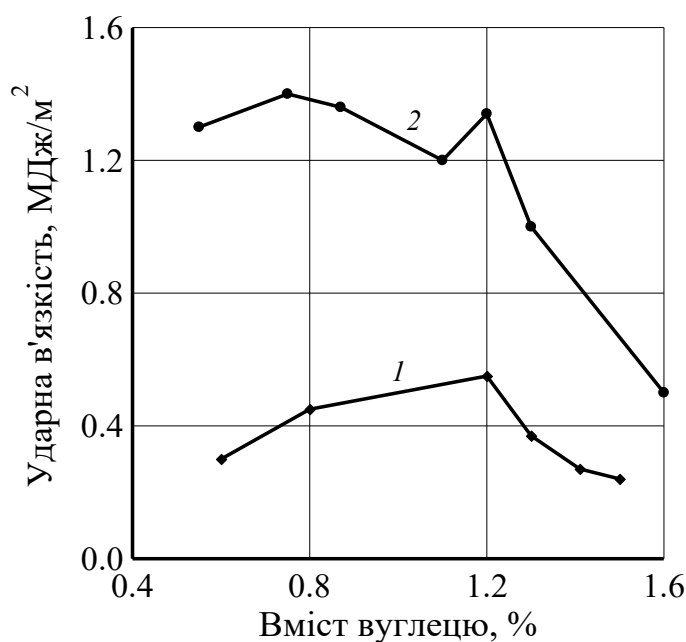


Рис. 1.1. Вплив вуглецю на ударну в'язкість 110Г13Л: 1 +20 °C; 2 -60 °C [16]

З підвищенням вмісту вуглецю зносостійкість сталі безперервно зростає, але ударна в'язкість знижується (рис.1.1), особливо з підвищенням концентрації вуглецю більше 1,2%. За даними роботи [3] максимальна ударна в'язкість сталі досягається при вмісті в ній 0,9...1,15% вуглецю. Вуглець зміцнює марганцевий аустеніт як у вихідному стані, так і після наклепування, утворює розчин проник-

нення, перешкоджає вільному переміщенню дислокацій. Взагалі вважають, що кожні 0,1% вуглецю в сталі понад 1% підвищує його абразивостійкість на 10% [15].

#### 1.1.4 Зносостійкі чавуни

Доевтектичні та евтектичні білі чавуни з перлітною, мартенситною і мартенситно-аустенітною матрицею використовують як зносостійкі металеві матеріали.

Білі леговані чавуни мають високий опір абразивному зношуванню завдяки присутності у своєму складі спеціальних карбідів хрому, молібдену, вольфраму, ванадію, титану і інших карбідоутворювальних елементів. Білі чавуни з високим вмістом хрому і підвищеним вмістом вуглецю почали використовувати ще на початку 30-х років минулого століття.

Основним легувальним елементом, що входить до складу зносостійких чавунів, є хром, який не тільки обмежує існування  $\gamma$ -області, але і утворює спеціальні карбіди з твердістю 1200...1500 МПа та в певній мірі стабілізує аустеніт. Особливо висока твердість чавуну досягається після введення в нього ванадію, титану, молібдену і вольфраму, що суттєво підвищує зносостійкість чавуну.

При відносно високих концентраціях хрому і марганцю чавуни мають перлітну структуру з карбідами цементитного типу  $Me_3C$ . Такі чавуни використовують для виготовлення деталей, які працюють в умовах чистого абразивного зношування (кулі для млинів, класифікаторів), які піддаються інтенсивному зносу [16].

З метою покращання механічних властивостей, твердості та в'язкості в чавуни додають нікель, молібден і мідь з одночасним підвищенням в них вмісту хрому до 10...14% і марганцю до 5%.

З цієї групи сплавів добре відомі за кордоном чавуни фірми "International Nickel Company". Це такі марки ІЧ200Х33НЗ, ІЧ300Х33НЗ та ін. . В останні 30...35 рр. конкурентноспроможними нікельхромистим є хромомолібденові чавуни. Їх розробником є американська фірма "Climax Molybden Company". Це чавуни

марок 15Cr-2Mo-1Cu; 20Cr-2Mo-1Cu; 20Cr-1Mo-1Ni. Всі вони обов'язково містять дефіцитні і дорогі нікель і молібден [17].

Дослідження вітчизняних учених показали, що молібден не справляє якогось специфічного, тільки йому властивого, впливу на зносостійкість та прогартованість. Необхідну структуру в хромистих чавунах можна одержати легуванням їх недефіцитними елементами і відповідним термічним обробленням. Це надасть цим чавунам схожі властивості, які мають хромомарганцеві чавуни з нікелем і міддю. Хромисті чавуни з додатковим легуванням використовуються для виготовлення деталей кульових млинів (бронеплити футерувальні та кулі), які забезпечують тривалу експлуатацію цих машин під час перероблення порід з високим рівнем абразивних складових [18].

При вмісті хрому в чавунах більше 10% і концентрації марганцю 4...8% в структурі матеріалу утворюється велика кількість спеціальних карбідів  $Me_7C_3$ , а тому карбіди цементитного типу практично відсутні в структурі [19].

Коли обмежений вміст марганцю перевищує 5%, а вміст хрому знаходиться в межах 20...30%, тоді отримують чавуни з аустенітно-феритною матрицею і точковими карбідами типу  $Me_7C_3$  і  $Me_4C$ . Для покращання в'язкості в склад цих чавунів додають до 3% нікелю і до 1% молібдену. Вони мають високу корозійну і кавітаційну стійкість в умовах одночасної дії абразиву і кавітації.

Чавуни після відпуску при температурі 560 °C мають твердість HRC 55...60. Серед високохромистих поширені чавуни марок: 280X34; 250X25T і інші, але найбільш поширеним зносостійким чавуном в країнах СНД, залишається хромо-нікелевий чавун 280X28H2. Частково це пояснюється деякою універсальністю цього чавуну: він не показує рекордних результатів щодо стійкості в різних умовах експлуатації, але є технологічним при виробництві литих деталей і зберігає високу зносостійкість [20, 21].

### 1.1.5 Хромисті жаростійкі сталі

Хромисті сталі найбільш економічні як з погляду легування і застосування в різних галузях техніки як неіржавкого корозійно- та окислостійкого матеріалу.

Залежно від структури та хімічного складу їх ділять на:

- теплостійкі хромисті сталі (з 5...10% Cr), вироби з яких після гартування на мартенсит використовують, переважно, в нафтовій промисловості;
- сілъхроми і інші клапанні хромисті сталі;
- неіржавкі хромисті сталі (з 12...13% Cr), які піддають гартуванню на мартенсит і використовують в різних галузях техніки;
- складнолеговані неіржавкі сталі з 12...17% Cr, які використовують для виготовлення литих деталей пічного і хімічного устаткування;
- неіржавкі і кислотостійкі хромисті сталі (16...20% Cr) напівферитного і феритного класів, вироби з яких використовують в хімічному машинобудуванні та устатковані, що працює при підвищених (до 800...850°C) температурах;
- хромисті жаростійкі сталі (з 25...33% Cr) феритного класу, які використовують для виготовлення виробів, що працюють до 1000 °C;
- хромоазотовані неіржавкі сталі мають широкий спектр використання від агресивних середовищ до високих температур;
- хромисті жаростійкі сталі з алюмінієм, кремнієм, титаном, азотом та іншими легувальними елементами, які використовують для виготовлення литих деталей пічного устаткування;
- хромисті сталі з алюмінієм і хромоалюмінієві сталі відносять до окремої групи сталей зі спеціальними властивостями [22].

Хром відноситься до другої групи легувальних елементів, які звужують область існування  $\gamma$ -Fe. Чистий хром від точки плавлення (яка за останніми дослідженнями дорівнює 1875 °C) до абсолютного нуля має ґратку об'ємноцентрованого куба. В зв'язку з цим необхідно зазначити, що елементи цієї групи утворюють певну систему структур, які проявляються і в бінарних сплавах з залізом.

Хром суттєво впливає на  $\gamma \rightarrow \alpha$  перетворення, переміщуючи його в область більш низьких температур. Проте не можна стверджувати, що здатність до перетворення залізо-хромистих сплавів підвищується тільки під впливом одного хрому. Це положення підтверджує той факт, що виокремлення доєвтектоїдного фериту в низьковуглецевій сталі здійснюється дуже повільно [23].

Як видно із діаграми стану залізо-хром (рис. 1.2.), високотемпературна область складається із безперервного ряду  $\alpha(\delta)$  – твердих розчинів з невеликою зміною параметрів кристалевої ґратки в межах, визначених для заліза і хрому (0,260...0,278 нм) [24].

В області сплавів, збагачених залізом, існує закрита область  $\alpha$ -твердих розчинів. До них прилягає перехідна гетерогенна область  $\alpha+\gamma$  твердих розчинів.

Введення хрому в залізо призводить до суттєвої зміни положення критичних точок, які фіксують  $\gamma \rightarrow \alpha$  перетворення.

На відміну від нелегованих сталей, хромисті мають підвищену сталість механічних і спеціальних властивостей після відпуску, що взагалі характерно для сталей, легованих карбідоутворювальними елементами [25, 26].

В хромистих сталях, як і в інших, що вміщують карбідоутворювальні елементи, завжди вдається здійснити повне відокремлення і формування карбідів під час відпуску мартенситу або під час нагрівання після перетворення. Це робить сталь м'якою і легкооброблюваною. Останнє має вагоме значення для використання хромистих сталей в техніці [27].

### **1.1.6 Хромоалюмінієві сталі**

Суттєве збільшення виробництва литих деталей із легованих жаростійких сталей почалося в 30-ті роки XX сторіччя, коли було відкрито, що додавання в залізохромисті і залізохромонікелеві сплави до 10% Al суттєво (в деяких випадках на багато разів) підвищує окалинотійкість цих сплавів і збільшує тривалість експлуатації виробів. Досліджуючи вплив алюмінію на окалинотійкість заліза було встановлено, що присадка близько 2% Al до заліза помітно знижує втрати сплаву на утворення окалини і що такий сплав з 8% Al має такий же високий опір окисненню, як і нікельхромовий сплав з 80% нікелю і 20% хрому [28].





ки на поверхні металу формується окалина із оксидів хрому і алюмінію типу шпінелі ( $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ ;  $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ) [29].

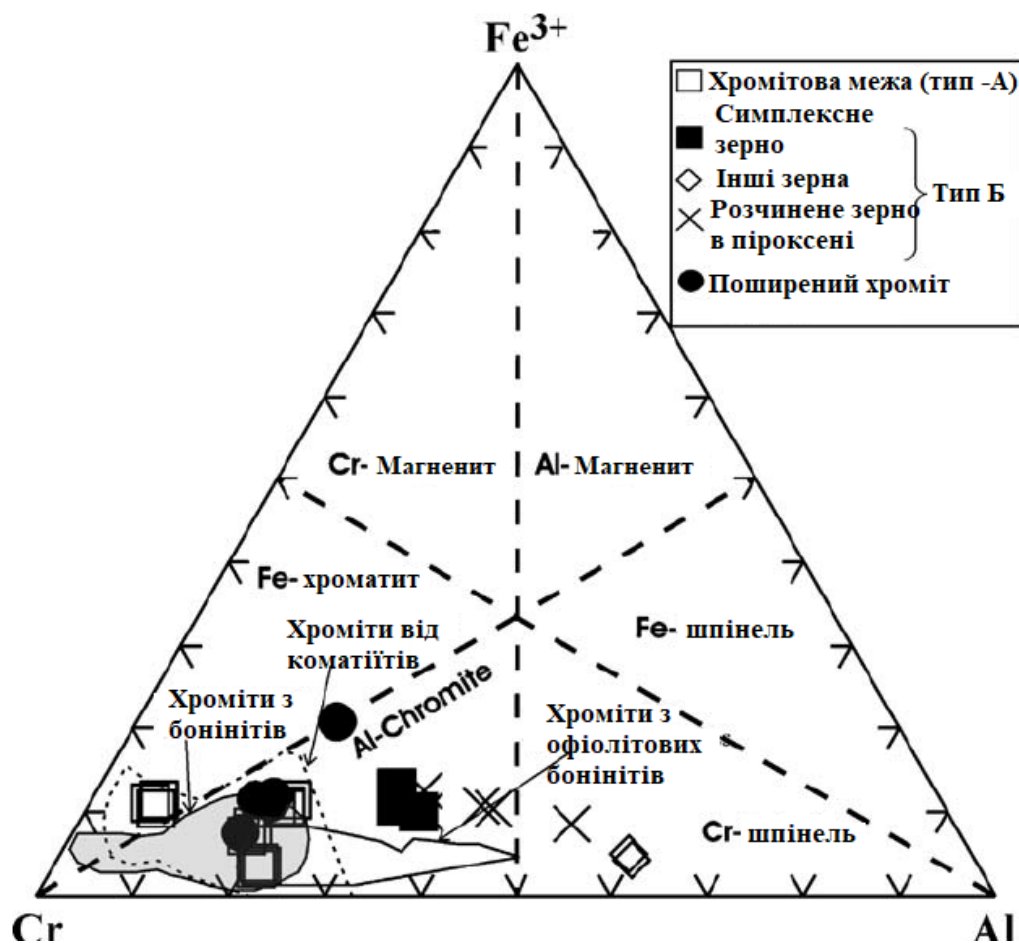


Рис. 1.3. Діаграма стану Fe-Cr-Al

Відсоткове відношення  $\text{Al}_2\text{O}_3$  і  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в шпінелі визначається концентрацією в сталі вказаних елементів і температурою окислення.

Завдяки високій окалиностійкості, маловуглецеві хромоалюмінієві сталі, які вміщують 25...30% Cr і 1...10% Al складають одну із важливих груп промислових сплавів, що працюють при температурах вище 1025 °C [30].

Наприклад, в техніці відомі маловуглецеві сталі з алюмінієм типу сплавів Корнилова (25% Cr і 5% Al) [31]. Проте для їх виробництва потрібні чисті щодо вуглецю матеріали: залізо армко і металічні хром, титан, що різко підвищує вартість виготовлених деталей і не завжди економічно виправдано. Крім того, маловуглецеві ( $\leq 0,1\%$  C) хромисті і хромоалюмінієві жаростійкі сталі нетехнологічні в

литті. Їх не можна використовуватись для виготовлення складних фасонних деталей.

В зв'язку з цим практичний інтерес представляють залізохромоалюмінієві жаростійкі сталі з більш високим вмістом вуглецю.

## **1.2 Вплив легувальних елементів на зносостійкість сплавів на основі заліза**

**Марганець.** Зміна концентрації марганцю в межах 9...15% помітно впливає на властивості сталі. Встановлено [32], що вміст марганцю, більше 12% підвищує схильність сталі до гарячих і холодних тріщин, при цьому помітний деякий ріст зерен аустеніту при нагріванні, під час гартування. Це сприяє зниженню зносостійкості сталі, але позитивно впливає на ударну в'язкість сталі (рис.1.4).

**Хром.** Хром є найбільш поширеним легувальним елементом. Його вводять в марганцеві зносостійкі сталі з метою підвищення їх зносостійкості. З підвищенням хрому в складі сталі покращується її прогартованість і досягається більш рівномірна твердість по всьому перерізу виливка.

Введення в сталь до 3% хрому підвищує її зносостійкість на 20...30%, але знижує ударну в'язкість. Проте при подальшому підвищенні вмісту хрому збільшує зносостійкість сталі менш помітно, через це рекомендується вводити в марганцеву сталь хром в кількості до 2% [33].

**Титан.** Титан є надзвичайно сильним карбідоутворювальним елементом.

Якщо відношення титану до вуглецю дорівнює 4:1, то майже весь титан витрачається на утворення карбідів титану і лише невелика частка  $Ti$  бере участь в утворенні твердого розчину. Якщо відношення титану до вуглецю більше, ніж 4:1, то залишок титану переходить в розчин, твердість металу після гартування, трохи нижча, але відпуск виробів підвищує їх твердість внаслідок виділення титанідів, тобто здійснення дисперсійного тверднення металу.

Якщо відношення менше, ніж 4:1, в розчин переходить збитковий вуглець, а при температурі вище 1200 °С і частина карбіду титану. Твердість виробів після гартування збільшується з підвищенням температури гартування.

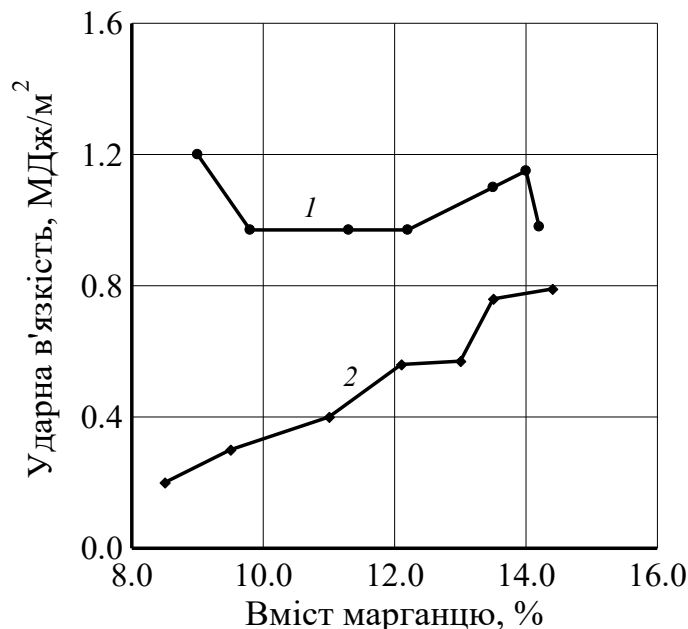


Рис. 1.4. Вплив марганцю на ударну в'язкість сталі 110Г13Л, температура досліджень: 1 +20°C; 2 – -60°C

Введення титану сприяє зміні величини зерна внаслідок утворення карбідів і карбонітридів. Ці сполуки титану мають дуже високу температуру плавлення і під час тверднення слугують центрами кристалізації, що сприяє подрібненню первинного зерна та підвищенню зносостійкості сталі.

Проте необхідно враховувати, що внаслідок утворення оксидів титану і його нітридних сполук, титан різко погіршує рідкотекучість сталі, а це не може сприяти одержанню якісних виливків і знижує ударну в'язкість сталі.

Мікролегування сталі титаном [34] підвищує на 15...20% її міцність, твердість і ударну в'язкість, а також покращує холодостійкість сталі. Вміст 0,10...0,15% титану в сталі підвищує зносостійкість робочих органів молоткових млинів і конусних дробарок в 1,5...1,8 рази.

**Бор.** Є активним модифікатором для конструкційних легованих сталей. Важливий вплив бору на властивості сталі полягає в його модифікувальній дії на

процеси кристалізації, внаслідок чого подрібнюється первинне зерно, а також здійснюється додаткове розкиснення і деазотування сталі. Бор змінює і стан меж зерен і межових шарів, що позитивно позначається на властивостях сталі. Цей елемент значно підвищує стійкість переохолодженого аустеніту в області бейнітного і перлітного перетворення, що позитивно позначається на ударній в'язкості, міцності і зносостійкості сталі.

Мікролегування сталі бором підвищує і її технологічні та експлуатаційні властивості і цим дозволяє знизити вміст в сталі хрому, ванадію, нікелю. Вводять бор в сталь в досить малій кількості – 0,001...0,005%.

За своїм впливом на властивості сталі бор ефективніший за інші присадки [35]. Дія його добавки 0,0015...0,0030 % рівнозначна дії 0,3 % хрому, 0,10...0,15 % молібдену та 0,12 % ванадію.

Проте до оброблення сталі бором треба підходити досить обережно, оскільки за деякими свідченням вже при вмісті 0,05 % бору сталь має крихкий злам при кімнатній температурі, а її зносостійкість погіршується на 10...15%.

**Молібден.** Молібден позитивно впливає на властивості сталі. Підвищення міцності, пластичності і ударної в'язкості сталі на 20...30 % спостерігається після введення в неї 0,5...0,6% молібдену. Зносостійкість сталі також підвищується на 20...30% [36]. Вольфрам також суттєво покращує всі механічні властивості і зносостійкість сталі, як і молібден [37].

**Ванадій.** Введення ванадію в вуглецеві сталі супроводжується покращенням їх властивостей.

Ванадій підвищує міцність сталі, подрібнює первинне зерно, покращує зварюваність і інші фізико-механічні, технологічні і експлуатаційні властивості. Встановлено, що ванадій зміцнює сталь в 4...8 разів сильніше, ніж марганець, кремній і нікель. Крім того, легування ванадієм дозволяє економити більш дорогі елементи: молібден, вольфрам, ніобій. Слід зазначити, що мікротвердість карбідів ванадію вища, ніж мікротвердість карбідів заліза, марганцю і хрому, внаслідок чого більш ефективно підвищується зносостійкість сталі.

Ефективне підвищення властивостей сталі спостерігається після введення в неї до 0,7% ванадію. Більший вміст ванадію погіршує властивості сталі, особливо пластичність, яка різко знижується. Присадка 0,7% ванадію за впливом на зносостійкість еквівалентна 6,5 % хрому [38].

**Ніобій.** Ніобій помітно покращує зносостійкість сталі внаслідок підвищення її загальної міцності. Невеликі добавки (до 0,25%) ніобію, особливо разом з 1...2% хрому, суттєво підвищують ударну в'язкість. Більші добавки ніобію знижують пластичні властивості сталі. Сталь з добавками 0,3...0,4 % ніобію перевищує за зносостійкістю сталь 110Г13Л в литому стані на 30...40 %, а після гартування на 10...15 %.

Максимальна зносостійкість сталі досягається введенням в неї 0,06...0,12 % ніобію. Подальше підвищення вмісту ніобію знижує зносостійкість сталі [39].

Молібден, вольфрам, ванадій і ніобій є досить дорогими і дефіцитними елементами, що гальмує їх використання.

**Кремній.** Вміст кремнію в сталі рекомендується обмежувати 0,5...0,6 %, оскільки цей елемент сприяє виокремленню карбідів інших елементів на межах зерен і знижує ударну в'язкість вже при кількості його 0,15 %. Внаслідок того що кремній досить сильно знижує теплопровідність сталі, він цим підвищує її схильність до утворення гарячих тріщин у виливках [40].

Кремній зсуває точку евтектоїдного перетворення у бік меншої концентрації вуглецю.

### 1.3 Вплив легувальних елементів на жаростійкість сплавів на основі заліза

**Хром.** Як вже відзначалось, хром відноситься до елементів, які звужують  $\gamma$ -область. Позитивний вплив, який здійснює хром на жаростійкість сталей шляхом утворення захисних плівок  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , сприяє широкому використанню його в сталях, виливки з яких працюють під дією високої температури. Зі збільшенням

вмісту хрому в сталі, збільшується її корозійна стійкість, а тому температурний інтервал експлуатації таких сталей однозначно залежить від вмісту хрому.

Хром використовують не тільки для легування жаростійких сталей, але і жароміцних. Найкращі показники повзучості сталі досягаються після додавання в сталь близько 12% хрому. Більш високі концентрації хрому в сталі знижують твердість, оскільки з підвищенням вмісту хрому утворюється малостійкий тригональний карбід  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ , максимальна кількість якого досягає 7 %, а після додавання в сталь понад 12 % Cr він призводить до утворення більш стійкого кубічного карбіду  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ .

Сталі набувають певної жаростійкості за умови вмісту хрому більше 13 %. Наприклад, сталь з 30 % Cr при 1200 °C має таку ж окалиностійкість, що й сталь з вмістом хрому 9...10 % при температурі 900 °C. Такий зв'язок між температурою, окалиностійкістю та вмістом хрому в сталі справедливий для окиснювального середовища. Для експлуатації виробів в умовах агресивних середовищ та більш низьких температур сталі можуть мати дещо менший вміст хрому.

Підвищення вмісту хрому сприяє покращанню рідкотекучості і зниженню лінійної усадки сталей, але при цьому зростає об'ємна усадка, підвищується кількість дефектів усадкового характеру, що знижує механічні властивості металу.

Хром негативно впливає на теплопровідність сталі, коли він знаходиться в рідкому металі. Така дія хрому призводить до росту первинного зерна при кристалізації, а в умовах експлуатації виробів – до накопичення напружин, оскільки завжди існує вірогідність тепловміни [41].

**Кремній.** Кремній підвищує окалиностійкість хромистих сталей, оскільки на поверхні металу під дією високих температур утворюється оксидний шар  $\text{SiO}_2$ , через який іони дифундують повільніше, аніж через плівки оксиду  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  та шпінелі типу  $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ . Додавання кремнію у сталі проводять для підвищення окалиностійкості виробів, які працюють до 1000 °C. До 0,6% кремнію в хромистих і хромонікелевих сталях сприяють підвищенню їх рідкотекучості внаслідок утворення легкоплавких силікатних сполук. Однак, кремній, як неметал, призводить до зниження теплопровідності та збільшення об'єму усадкових раковин у вилив-

ках. 1 % Si може замінити 1 % Cr [32], що знижує кількість вмісту відносно дорогого Cr.

Проте захисна дія кремнію в атмосфері, яка вміщує водяну пару, практично не проявляється.

Неметалічні вкраплини у вигляді силікатів і оксиду  $\text{SiO}_2$  суттєво знижують пластичність сталей навіть за кімнатних температур.

Дослідження термостійкості хромоалюмінієвих сталей з 2 % Si при високих температурах і незначних температурних перепадах установили, що кремній майже вдвічі знижує термостійкість сталі внаслідок крупного первинного зерна і низької теплопровідності.

Отже кремній є корисним в хромистих і хромоалюмінієвих сталях тільки в невеликій кількості (до 1%), незважаючи на те що він сприяє покращанню рідкотекучості [42].

Слід зазначити, що кремній найбільш позитивно впливає на підвищення жаростійкості, коли виріб працює в окислювальній атмосфері [43].

**Алюміній.** Має велику хімічну спорідненість до кисню, утворює на поверхні виробу тверду захисну плівку оксидів  $\text{Al}_2\text{O}_3$  або шпінелі  $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  з температурою плавлення близько 2050 °C.

Поєднання у чавуні 2...6% Cr і 6...7% Al забезпечує одержання високої жаростійкості металу аж до 1000 °C, а додавання 10...12 % Cr підвищує температуру експлуатації виробів до 1100...1200 °C. Якщо сплав містить 11...18% Al і 15...20% Cr то за даними Бобро Ю.Г. [44] такий чавун не має рівного собі сплаву на залізній основі щодо окалиностійкості та ростостійкості під дією температур до 1200 °C. Особливо високу окалиностійкість має сплав 200X30Ю6 (30% Cr, 6% Al, 2% C) при температурах експлуатації до 1200 °C.

Недоліком сплавів з підвищеним вмістом алюмінію (8...20%) є їх висока твердість і погана оброблюваність. Поверхневі шари окалини, легованих такою кількістю алюмінію сталей, стають твердими і відшаровуються під дією незначних ударів і змін температури.

Кращі властивості мають хромисті сталі з оптимальним вмістом алюмінію.

Корніловим і Міхєєвим [31] розроблено жаростійкі залізохромоалюмінієві сплави типу 10X25Ю5, які можуть експлуатуватися без значного окиснення при стаціонарних температурах до 1300 °С. Проте ці сплави малотехнологічні як ливарний матеріал, оскільки вміст вуглецю в них не перевищує 0,1%. Для виготовлення із них виробів необхідно мати чисті за вуглецем матеріали: армко залізо, безвуглецевий ферохром або чистий хром, що суттєво здорожує продукцію ливарного цеху.

Невеликі добавки алюмінію (до 1%) сприяють підвищенню міцності литої деталі і майже не впливають на пластичність. Подальше підвищення вмісту алюмінію різко знижує пластичність сплаву. Додавання алюмінію в невеликій кількості (0,2...0,3%) у вуглецеву сталь є корисним, а в хромисту неіржавку сталь сприяє підвищенню її жаростійкості в умовах експлуатації при температурах, вищих 600 °С [45].

Висока швидкість дифузії Al у фериті обумовлює у хромистих сталях значне зниження окалиноутворення. При цьому утворюються оксиди хрому та алюмінію, співвідношення яких визначаються концентрацією Cr та Al і температурою експлуатації.

Отже Cr та Al справляють позитивний вплив на окалиностійкість, проте оптимальне їх співвідношення до конкретних сплавів не встановлено.

**Титан** знаходить все більше використання для покращання властивостей жаростійких і жароміцних сталей. Проте єдиної думки щодо оптимальної концентрації його в цих сталях не існує.

Відомо, що титан утворює стійкі карбонітриди з високою температурою розчинення, які є центрами кристалізації і подрібнюють структуру та підвищують механічні властивості сталі. За А.Б. Кінцелом і Р. Френком [46] титан підвищує міцність і знижує пластичні характеристики високохромистих сталей.

За даними М.В. Приданцева та К.А. Ланської [47] збільшення вмісту титану до 2,0% у хромоалюмінієвих сталях знижує їх термостійкість у два рази. І.І. Корнілов [48] відзначає покращання окалиностійкості хромоалюмінієвої сталі 10X25Ю5Л після додавання до 0,5% титану через звільнення і перехід у твердий



розчин частини хрому, який може бути зв'язаним у карбіди, а також внаслідок покращання захисних властивостей оксидної плівки і зменшення швидкості вигорання з сплаву алюмінію. За іншими даними [33] вміст титану у жароміцних сталях повинен відповідати рівнянню  $Ti_{\min} = 4C$ , а роботах [22, 49, 50] відзначається покращання окалиностійкості після додавання в сталь до 1% титану.

Аналіз робіт, направлених на вивчення впливу титану на властивості жаростійких сталей, свідчить про позитивний його вплив на структуру і міцність сталі при кімнатних і високих температурах і покращання усіх механічних властивостей [51, 52]. Титан підвищує температуру плівкоутворення жаростійкої сталі [53], що вимагає значного перегрівання сталі перед заливанням її у форми [54].

Додаткові дослідження впливу титану на властивості жаростійких сталей дозволять чітко визначити межі його вмісту в таких сплавах.

**Вуглець.** Вуглець відноситься до елементів, які розширюють область існування  $\gamma$ -заліза. Розширюючи область  $\gamma$ -твердого розчину і утворюючи карбіди з високою міцністю міжатомних зв'язків, вуглець є ефективним зміцнювачем будь-якої сталі. Його вплив на підвищення твердості виробу в умовах експлуатації визначається термічною стійкістю карбідних фаз, які утворюються в процесі кристалізації, і склад яких залежить від кількості в сталі карбідоутворювальних елементів.

У сталях, які працюють тривалий час, негативний вплив підвищеного вмісту вуглецю виявляється тільки тоді, коли більш інтенсивно проходить перерозподілення легувальних елементів між твердим розчином та карбідною фазою. Вуглець негативно впливає на пластичність, знижує опір поширенню тріщин, а також негативно впливає на зварюваність сталі. Вміст вуглецю в 12%-й хромистій сталі повинен бути у межах 0,14...0,20 % [55, 56].

Окалиностійкість феритних сталей з 30 % Cr і більш високим вмістом вуглецю, а значить з великим вмістом розчинювальних карбідів, знижується з підвищенням вмісту вуглецю, внаслідок відбирання вуглецем частин хрому, який міг би утворювати твердий жаростійкий розчин.

**Рідкоземельні метали.** Для покращання технологічності і підвищення жаростійкості високолегованих сталей й сплавів необхідно повністю видалити легкоплавкі елементи, які негативно впливають на експлуатаційні характеристики металу. Для цього використовують рідкоземельні метали, які переводять легкоплавкі сполуки у тугоплавкі і сприяють переходу їх із металу у шлак.

Оптимальна кількість РЗМ певною мірою визначена природою та хімічним складом сплаву і знаходиться тільки експериментально, залежно від технології введення їх у розплав.

Тому підвищення окислостійкості спостерігається уже навіть після додавання в сталь від 0,05 до 0,20 % РЗМ. Тривалість експлуатації виробів, виготовлених із сталі, обробленої РЗМ, підвищується в 5...10 разів [57].

#### **1.4 Процеси розчинення феросплавів в рідкому металі**

Процес розчинення твердого феросплаву при безпосередньому його контакті з розплавом здійснюється в три стадії [58]. На першій атоми твердого речовини переходять через границю розділу фаз і розчиняються в розплаві. Якщо температура плавлення твердого феросплаву  $T_n$ , нижче температури розплаву  $T_b$ , то такий перехід відбувається шляхом попереднього плавлення і потім розчинення рідкої речовини в розплаві. При цьому, залежно від швидкості розчинення рідкий метал розчиняється поблизу твердого шматка, або рідкі краплі конвективними потоками разносяться по розплав і розчиняються в його обсязі. Якщо  $T_n > T_b$  і розплав містить відповідні домішки, то на поверхні твердого тіла можливе утворення сполук, температура плавлення яких нижча  $T_b$ . Якщо при цьому легкоплавкі сполуки не утворюються, то атоми, що знаходяться на поверхні твердого тіла, відриваються від кристалеві гратки і переходять в розплав з утворенням поблизу твердої поверхні розчину, насиченого атомами речовини, що розчиняється. Плавлення, руйнування кристалеві гратки і розчинення супроводжуються поглинанням або виділенням тепла. На другій стадії розчиняються атоми через що утворюється близько твердого тіла дифузійний прикордонний шар і переносяться в основну масу розп-

лаву. На третій – збагачений розчиненою речовиною розплав розноситься по всьому об'єму. Залежно від конкретних умов, теплофізичних властивостей речовини і розплаву лімітуючими стадіями будуть фазовий перехід, тепло- або масопередача. Крім того, процеси тепло- і масопередачі визначаються характером переміщення твердого тіла щодо розплаву. Третя стадія описаного процесу (взаємодія розчиненої речовини з елементами розплаву, виділення продуктів реакцій цієї взаємодії) проходить незалежно від розмірів, щільності і теплофізичних властивостей твердого шматка і слабо залежить від швидкості і характеру протікання першої та другої стадій. Тому при аналізі впливу характеристик шматка феросплаву на швидкість його засвоєння головна увага можна зосередити на перших двох стадіях розчинення.

Розглянемо процес розчинення твердого шматка феросплаву, що має температуру плавлення  $T_n$ , який повністю занурений в залізовуглецевих розплав (сталь) з температурою  $b$ . В реальних умовах початкова температура шматка феросплаву  $T_e$  завжди менше температури кристалізації сталі  $T_n$ , і тому спочатку на його поверхні утворюється кірка твердої сталі [12, 58, 59]. Подальший хід розчинення залежить головним чином від співвідношення між  $T_n$ ,  $T_k$ ,  $T_b$  (надалі умовно залізовуглецевий розплав і тверду фазу називаємо сталлю). Феросплави діляться на три групи: легкоплавкі ( $T_n < T_k$ ), тугоплавкі ( $T_k < T_n < T_b$ ), надтугоплавкі ( $T_n > T_b$ ). Як видно, класифікація феросплавів не абсолютна, а відносна – по відношенню до даного залізовуглецевого розплаву, тобто для даних значень  $T_k$  і  $T_b$  [60].

Легкоплавкий феросплав. Процес розчинення його проходить в три періоди (рис. 1.5). Протягом періоду *a* феросплав прогрівається і при  $T_n$  поверхня шматка феросплаву починає плавитися. Феросплав при цьому знаходиться в оболонці твердої сталі, товщина якої або збільшується протягом всього періоду, або до кінця його зменшується. У період *б* феросплав плавиться під кіркою твердої сталі за рахунок тепла, що надходить від залізовуглецевого розплаву. Залежно від конкретних умов (величини теплового потоку, теплофізичних властивостей феросплаву) період закінчується або повним розплавленням феросплаву і утворенням рідкого ядра в оболонці твердої сталі, або повним розплавленням твердої оболонки і за-

нуренням частини шматка феросплаву, що не розплавився в рідкій сталі. Останній період залежно від того, як закінчується період  $\bar{b}$ , може мати два різновиди ( $\bar{v}$  і  $\bar{z}$ ). У період  $\bar{v}$  плавиться оболонка твердої сталі і рідке ядро прогрівається. Він завершується повним розплавленням оболонки і розчиненням рідкого ядра в розплаві. У період  $\bar{z}$  твердий шматок феросплаву плавиться, безпосередньо контактуючи з рідкою сталлю. У періоди  $a$ ,  $\bar{b}$ ,  $\bar{v}$  відсутній прямий контакт феросплаву з рідкою сталлю. Тому взаємодія (хімічна, розчинення з виділенням або поглинанням тепла) можлива тільки в період  $\bar{z}$  між феросплавом і рідкою сталлю, або в періоди  $\bar{b}$ ,  $\bar{v}$  між твердою оболонкою сталі і рідким феросплавом. Ці процеси можуть прискорити розчинення феросплаву. Для великих шматків після закінчення періоду  $\bar{b}$  і неповного розплавлення феросплаву внаслідок недостатнього прогріву залишається тверда частина, та можливо наростання нової твердої кірки сталі і продовження періоду  $\bar{b}$  [61]. Періоди  $\bar{b}$  і  $\bar{v}$  відрізняються від інших наявністю під оболонкою твердої сталі рідкого феросплаву. Плавлення при постійному тиску зазвичай супроводжується зменшенням щільності феросплаву.

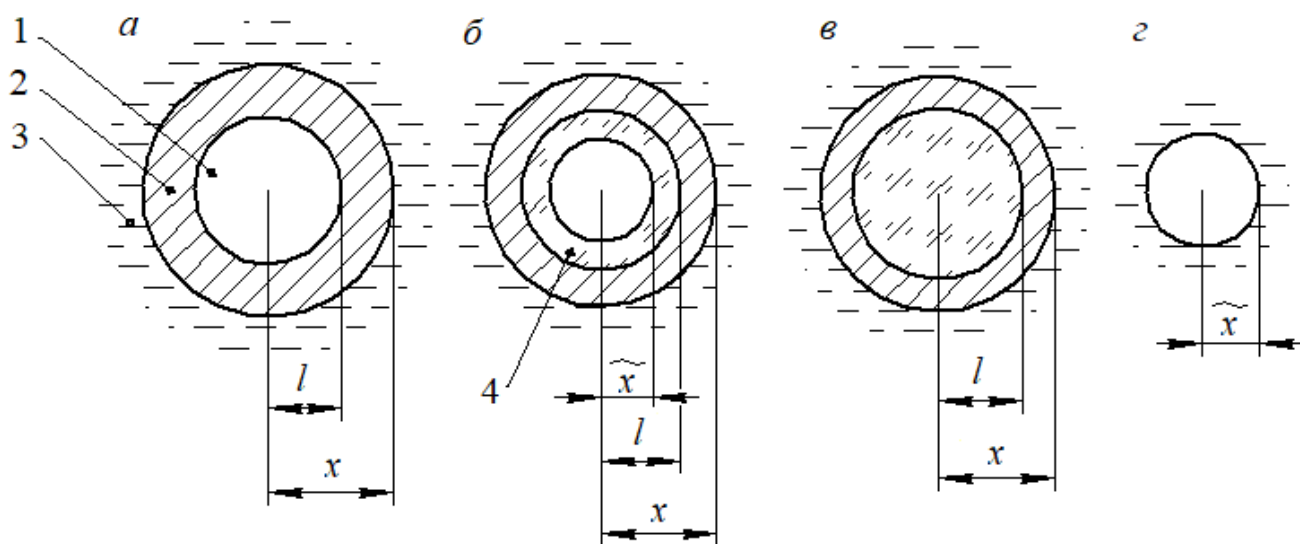


Рис. 1.5. Плавлення легкоплавкого феросплаву:  $a$ ,  $\bar{b}$ ,  $\bar{v}$ ,  $\bar{z}$  – періоди плавлення, 1 – твердий феросплав; 2 – кірка твердої сталі; 3 – рідка сталь; 4 – рідкий феросплав.

Методи дослідження процесів розчинення феросплавів в металевих розплавах. Основний експериментальний метод – вимірювання швидкості зміни маси зразка феросплаву шляхом безперервного або періодичного зважування – використовується для феросплавів всіх трьох типів: легко-, туго- і над тугоплавкі. Для останніх застосовується також метод обертового в розплаві диска з однаково доступною поверхнею.

За результатами цих робіт можна зробити висновок, що швидкість розчинення сплавів лімітується процесами тепло- і масообміну між шматком і розплавом. На гальмування зростання кірки найбільший вплив робить стрибкоподібне зниження теплопровідності сплавів при переході з твердого стану в рідкий (закон Мотта) [62]. Поява рідкого шару при інших рівних умовах виникає швидше у феросплавів зі зниженою температурою плавлення, отже, тепловий період у них коротше. На думку автора, прискорення процесу плавлення визначається великим тепловим ефектом розчинення сплавом з сталі (відбувається розігрівання рідкого шару, який контактує з феросплавом), попереднім нагріванням і зменшенням розміру феросплавів, збільшенням температури сталі і швидкості її перемішування.

Для визначення кінетики розчинення сплавів в металевих розплавах застосовували методи вимірювання температур і електрорухомих сил. Методом ЕРС за допомогою вольфрамових токопідводів знаходили різницю температур розплаву і введеної навіски з подальшим виміром кількості розчиненого елемента в магнетитових гальванічних осередках з двома відділеннями. Час розчинення металів можна визначати також при калориметричних вимірах по кривим зміни температури, тобто за тривалістю температурного стрибка в тиглі, приймаючи, що процес розчинення закінчується в точці, в якій починається ньютонівське охолодження. В роботі [63] за методом радіоактивної індикації фіксували «сплески» радіоактивності металу після розплавлення зразків феросплавів і вимірювали активність відібраних проб. Автори [64] вивчали характер розчинення феросплавів шляхом завантаження зразків на поверхню розплавленої в тиглі сталі; після витримки (5 і 15 хв) і охолодження сталеві злитки розрізали і визначали хімічний склад за їх ви-

сотою. Автори [65] досліджували розчинення феросплавів в сталі методом напів нескінченних циліндрів в атмосфері аргону; розподіл елементом по висоті сталевих зразків виявляли спектральними методами, різниця концентрацій елемента по висоті брали за критерій швидкості розчинення. Можливо дослідження кінетики розчинення методами рентгенівської інтроскопії з високоточною візуальною інформацією. Вивчення розчинення міді і свинцю в рідкому алюмінії при 1000 °C показало, що воно протікає нерівномірно шляхом відривання окремих блоків. Автори [66] вважали, що при розчиненні розкиснювачів в рідкій сталі має місце стадія емульгування. В роботі [67] описаний досить поширений спосіб вимірювання швидкості розчинення і засвоєння феросплавів в сталі шляхом відбору проб рідкої сталі з лабораторного тигля або промислової печі (ковша) після введення в ванну сплаву з подальшим аналізом зразків. Необхідно відзначити роботу [68], в якій викладено результати моделювання розчинення феросплавів в рідкій сталі під час заливання її в ківш. Моделювання проводилося шляхом вимірювання швидкості розчинення кульок з солі у воді. Встановлено залежність швидкості розчинення від щільності кульок.

Останнім часом широко використовують методи математичного моделювання розчинення шматків феросплавів в рідкій сталі [69]. Тут вирішується чисельним методом система диференціальних рівнянь похідних з відповідними граничними і початковими умовами. До переваг цих робіт віднесемо можливість дослідження процесу плавлення будь-яких феросплавів в різних умовах (в тому числі і таких, які неможливо відтворити на лабораторних установках). Недолік полягає в тому, що точність результатів розрахунків суттєво залежить від точності застосовуваних критеріальних формул для коефіцієнтів тепло- і масоотдачі. Однак навіть при невисокому ступені точності за такими результатами можна судити про відносну (по відношенню один до одного) швидкість розчинення різних феросплавів.

## **1.5 Методи виготовлення виливків з диференційованими властивостями поверхні і окремих частин литої заготовки**

Одним із резервів підвищення експлуатаційних властивостей виливків є утворення на їх поверхні шару металу, який мав би особливі, раніше запрограмовані, структуру і службові властивості. Формування робочого шару композиційних виливків найбільш часто здійснюється методом поверхневого легування з використанням різних обмазок або армуванням поверхні виливка вставками, попередньо виготовленими тим або іншим способом (штамповкою, гальванопластикою, механічним обробленням, точним литтям та ін.) [70].

Поверхнєве легування дозволяє значно підвищити зносостійкість виливків внаслідок керування процесами структуроутворення поверхневого шару [71].

За типом матеріалів, які використовують, відомі способи поверхневого легування можна умовно розділити на три групи:

- легування за допомогою феросплавів;
- легування за допомогою тугоплавких матеріалів (карбідів, нітридів, оксиди);
- легування з використанням чистих металів або спеціальних лігатур.

Поверхнєве легування здійснюється шляхом нанесення на поверхню виливка легувального компонента (припилу, пасти, фарби). Рідкий метал, який заливають у форму, вступає у взаємодію з припилом, пастою або фарбою. Останні розчиняються в ньому і утворюють легований шар, властивості якого відрізняються від матричного металу. Таким способом за літературними даними можна одержати легований шар товщиною до 7...12 мм [72].

Інтенсивність протікання процесу легування визначається ступенем підвищення температури основного металу над температурою нульової рідкотекучості, між товщинами виливка і покриття.

Проте, чим більша різниця температур перегрівання основного металу і плавлення покриття, тривалість їх взаємодії і менша товщина покриття, тим в бі-

льшій мірі понизиться вміст легувальних елементів в робочому шарі, і експлуатаційні характеристики підвищуються незначно.

Для виготовлення сталевих виливків використовували обмазки із порошку низьковуглецевого ферохрому (69 % хрому, 0,6 % вуглецю) і рідкого скла (густиною  $1300 \text{ кг/м}^3$ ). Оптимальним відношенням товщини стінки виливка, яка піддається легуванню, до шару обмазки є 1 до 6 [72]. Недостатнє перегрівання сталі призводить до слабкого розплавлення обмазки, значна частина якої видаляється при вибиванні виливків із форми, а високе перегрівання – до повного розплавлення її, часткового відривання легованого шару від поверхні виливка і переміщуванню його в центральні зони виливка.

При використанні легувальних покриттів, які мають більш низьку температуру плавлення, ніж сталь, на легованій поверхні виливка з'являються відкриті газові раковини, оскільки основний метал і легований шар протягом деякого часу знаходяться в рідкому стані, а кристалізація при цьому починається не з поверхні виливка, а з основного металу, то феростатичного тиску рідкого легованого шару стає недостатньо для протидії тиску газів на межі розділу форма-легований шар. Це і сприяє утворенню відкритих газових раковин [73].

Для попередження цього явища, як стверджують автори, необхідним є такий процес, при якому розплавлене легувальне покриття затверділо б раніше, ніж матричний метал, тобто металостатичний тиск розплаву не дозволив би проникнути газам в покриття.

Для попередження газових раковин запропоновано також відводити газ із стрижнів методом вакуумування і використовувати негасотвірні стрижні [74]. В цьому випадку вірогідність ураження газовими раковинами виливка мала.

В випадку використання легувальних покриттів, у яких температура плавлення вища або близька до температури рідкого металу, що заливається у форми, провідною стадією процесу поверхневого легування є проникнення рідкого сплаву в пори покриття. Сплав, що проникає у легувальне покриття, розчиняє тверді металічні частини, при цьому відбуваються зміни хімічного складу сплаву, на



межі розподілу покриття – метал основи. Визначальними процесами при цьому є дифузійні.

Інтенсивність розчинення часточок легувального покриття, серед інших факторів, визначається перш за все швидкістю проникнення основного сплаву по капілярам, які характеризуються розмірами часточок складових легувального покриття.

Як тверді складові легувальних обмазок нерідко використовують карбіди та нітриди металів. Суміші карбідів WC, TiC, WC-W<sub>2</sub>C, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, TiN, ZrC, замішані на рідкому склі, просочували сталями 5ХНМ та Р18, білим і сірим чавунами [75]. При цьому встановлено, що оксиди легувальних елементів і водний розчин рідкого скла утворюють неметалеві вкраплини, частина яких спливає на поверхню легованого шару, а інша частина залишається в легованому шарі, розташовується на межі розділу легувальне покриття – основа.

Для підвищення зносостійкості сталевих виливків в поверхневий робочий шар виробу рекомендують вводити тверді неметалічні вкраплини – кварцит і корунд. Так, при додаванні до високовуглецевого ферохрому 4 % корунду при легуванні поверхні виливків одержані позитивні результати, але спосіб не знайшов широкого використання через слабкий зв'язок легованого шару з основним металом.

Відомий також спосіб легування виливків шляхом нанесення на поверхню форми або стрижня легувальних елементів у вигляді тонкої металічної плівки, яка утворюється внаслідок термічного розпаду карбонідів відповідних металів. Для нанесення плівки пари вказаних сполук в суміші з інертним газом продувають через порожнину нагрітих ливарних форм. Технологія дозволяє отримати на поверхні форми декілька послідовно розташованих шарів або один шар із суміші різних металів для складного легування. Проте ця технологія є дорогою для серійного виробництва.

Нанесення на модель кристалогідратів, отриманих в результаті взаємодії ортофосфорної кислоти з оксидом легувального компоненту, є також одним із способів. Після виймання моделі шар кристалогідратів залишається в формі і взаємо-

діє з металом виливка. Проте, отриманий робочий шар має шорстку поверхню і невелику товщину.

В останній час легувальні обмазки наносять на модель, покриту поліетиленовою плівкою при використанні вакуумного формування. Технологія дозволяє отримати виливки з малою шорсткістю поверхні, але товщина легованого шару обмежена.

Для виливків із складною конфігурацією з метою покращання службових характеристик поверхневий композиційний шар отримують, використовуючи армувальні вставки у вигляді пористих металокерамічних оболонок або виготовлених із іншого (зносостійкого або жароміцного) матеріалу.

Використання для композиційного литва вставок, спечених із порошків металів, має ряд особливостей порівняно зі вставками на зв'язуючих компонентах. Відсутність неметалічних краплин, можливість формування композиційного шару на вертикальних поверхнях виливків у формі, відсутність спікання і розривання оболонок, зберігання заданого розташування компонентів в структурі композиційного шару і відсутність газових раковин на поверхні виливка дають можливість вважати такий спосіб за перспективний.

Для якісного і повного просочування, пористі оболонки занурюють в матричний метал через шар флюсу.

Другий метод просочування оболонок [76] передбачає виготовлення своєрідного “сирця-оболонки” із термопластичного шлікера із більш тугоплавких металічних порошків і ливникову систему із шлікера із менш тугоплавких порошків металу. Спікання такого “сирця” здійснюють в засипці, але без герметизуючого затвора, оскільки продукти неповного згоряння пластифікатора утворюють захисну атмосферу на час, достатній для розігрівання заготовки до температури плавлення металу ливникової системи. Потім такі оболонки з попередньо-заповненими порами встановлюють в ливарну форму і заливають матричним металом, з'єднуючи їх внаслідок механічних і дифузійних зв'язків [77].

Тверді оболонки виготовляються різними методами:

— механічним обробленням;

- штампуванням, тобто пластичним деформуванням;
- методом гальванопластики.

Використання таких оболонок особливих проблем не створює. Найбільш важливо – це досягти формування перехідної зони між оболонкою і матричним металом.

Широко відомі роботи щодо виготовлення армованих виливків шляхом заливання рідкого металу на механічно оброблену тверду непористу вставку. Цей спосіб отримав найбільше поширення для фасонних виливків із чорних сплавів з перехідною зоною сталь – чавун, сталь – сталь, чавун – чавун. Для отримання міцного з'єднання вставки з основним металом, Важливо правильно вибрати її товщину і температуру металу перед заливанням [78].

Описані методи армування виливків твердими непористими вставками дозволяють вирішити деякі конструктивні і технологічні задачі – здійснювати місцеве зміцнення і підвищення зносостійкості або жаростійкості, тобто оберігати виливки від корозії, економити дефіцитні матеріали, підвищувати якість оброблення і знижувати у багатьох випадках собівартість виливків.

Для виготовлення прес-форм для лиття за моделями, що витоплюються, крім гальванопластикових оболонок, використовують оболонки, отримані плазмовим напиленням різних порошків металів на металічні і гіпсові моделі [79]. Утворену оболонку товщиною 0,15...0,5 мм заливають легкоплавким сплавом або засипають металічним порошком з подальшим спіканням.

Одним із шляхів підвищення технологічності виготовлення деталей є заміна частин виливка простої або нескладної форми елементами, виготовленими волочінням або прокатуванням, а також безперервним литтям.

В машинобудуванні знайшло поширення використання біметалічних виливків системи алюміній – сталь з дифузійним металічним зв'язком. Найбільш характерним представником деталей подібного типу є чавунна гільза двигунів внутрішнього згорання з прилитими алюмінієвими ребрами вакуумного охолодження [80].

Композиційні виливки можна виготовляти способом заливання рідкого металу на твёрдосплавні пластини груп “ВК” і “ТК”.

Економічно вигідно виготовляти армувальні вставки методами точного лиття.

Слід відзначити, що використання композиційних виливків в промисловості обмежене через недосконалість технологій їх виготовлення.

Аналіз методів зміни властивостей поверхні литих деталей або окремих частин виливків наведено в таблиці 1.4.

## **1.6 Поверхнєве легування як метод одержання виливків з диференційованими властивостями поверхні**

### **1.6.1 Механізм поверхневого легування**

Можливість отримання поверхневого шару виливка з потрібними властивостями шляхом поверхневого легування в процесі лиття викладена у ряді робіт. [79, 80]. Суть цього методу полягає в тому, що на поверхні форми або стрижня, які формують в виливку місця, що піддаються, наприклад, інтенсивному зносуванню, наносять легувальні покриття в вигляді фарби, пасти, облицювального шару або вставок, наповнювачами в яких є відповідні легувальні елементи або їх сполуки. Залитий в форму метал взаємодіє з легувальним покриттям, в результаті чого поверхня виливка насичується відповідними елементами.

Дані щодо використання поверхневого легування для підвищення стійкості чавунних прокатних валків відомі більше ста років із праць професора Харківського університету А. Мевиуса, зокрема, з його роботи “Чавуноливарне виробництво”, виданої в 1859 р. Проте процес поверхневого легування виливків безпосередньо в ливарній формі не отримав широкого промислового використання. Цьому перешкоджає незначна товщина легованого шару, дефекти поверхні (раковини, неметалеві краплини), нестабільність хімічного складу і властивостей, відсутність надійної і простої технології виготовлення виливків з легованою поверхнею.

Очевидно, це можна пояснити недостатньою вивченістю механізму процесів, які відбуваються на межі виливок – покриття.

В теперішній час уявлення про механізм поверхневого легування дещо змінилися.

В роботах [79, 80] механізм поверхневого легування пояснюють з точки зору переходу легувальних елементів із обмазки форми в поверхневий шар виливка наступним чином.

Таблиця 1.4

## Технології нанесення легувальних покриттів

ПРИЗНАЧЕННЯ	Спосіб нанесення покриття	Товщина легувального покриття, фракція, мм, мкм	Склад легувального покриття			Товщина стінок виливка, мм	Матеріал виливка	Результати по-верхнього легування	Джерело
			наповнювач, %	зв'язуючий компонент, %	спеціальні добавки, %				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Збільшення жароміцності, зносостійкості і корозійно стійкості поверхні	Пензлем на оболонковий стрижень	—	Ni, Co	Фенолові селікатові смоли 0,1...1,0 %	Розчинник етилен - гліколь	—	Чавун, сталь	—	24
Підвищення міцності поверхні	На поверхні робочої поверхні	—	65% високо-вуглець FeCr	5 % фенолової смоли	25 % метилового спирту, 25 SiO <sub>2</sub> , 3% Zr	—	—	—	5
Утворення покриття на частині поверхні	В вигляді облицювального шару	10	50 % FeCr, FeAl, FeSi	Фенолова смола, парафін	Ацетон, спирт	—	—	—	61
Для знеміцнення поверхні виливка	—	—	Se, Bi, Fe, Pb, S, Sb	Рідке скло, полівініл	—	—	Легована сталь	6 мм товщина шару	62
Виготовлення лемешів із сталі з легувальною зносостійкою окрайкою	Засипання в форму	2...25	Fe-Cr, Fe-Mn, Fe-B, Fe-Ti	—	—	≈30	Бессельєрівська сталь	Зносостійкість на 50 %	63
Отримання високо-легованого шару на поверхні виливка	На поверхню форми або холодильника	10	—	Акрилова смола	—	—	—	—	62
Локальне об'ємне легування виливків	Встановлення, спеціальних вставок	—	FeCr	4 % фенолової смоли	Спирт, ацетон	—	Сталь	—	12

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Поверхнєве легування і модифікування виливків	Між двома шарами плівки за допомогою вакуумування	—	—	—	—	—	—	—	64
Отримання покриття з високим опором на випаровування	На поверхню форми	—	Fe-Cr або карбіди W, Ti, V	Водний розчин рідкого скла	Бура, оксид бору	—	—	—	65
Підвищення стійкості до сірководяної корозії	Електрохімічне покриття	— 0,03...0,05	Карбід Ni, Cr	—	—	—	Сталь 20	—	66
Отримання покращеного поверхневого шару	На поверхню форми пензлем	8	FeCr, FeMn, FeAl	4 % фенолової смоли	Метилловий спирт	—	—	—	67
Виготовлення зносостійких литих деталей	В струмінь рідкого металу	0,015	Карбід W	—	—	—	Чавун	—	67
Отримання виливків з зонами підвищеної зносостійкості	Заливання металу через пористу форму	=	Fe-B	Водний розчин гідросилікату	корунд	—	Марганцева сталь	—	66
Отримання біметалічних виливків	Встановлення в формі фольги з наступним підпресовуванням	—	—	—	—	—	—	—	67
Легування поверхні вилівка при твердненні	Наноситься на неохололий виливок	0,04	FeCr	—	—	33	Сталь	—	68
Поверхнєве зміцнення виливків легувальним металом	Фільтрація металу через обмазку	10...12	FeCr	—	—	30	Сталь 30Л	—	69
Екзотермічний спосіб поверхневого легування	Загартування в струмені повітря(до 900°C	0,3...0,5	Окалина, Al						70

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Гільза циліндра із композиційного матеріалу з високою зносостійкістю	В рідкий метал	–	0,3...0,4 Cr, Ni, Cu	–	–	–	Чавун з кулькоподібним графітом	–	71
Поверхнєве легування виливків	Наноситься на поверхню ливарної форми	–	Mn, Cr	–	–	–	Вуглецева сталь	–	70
Поверхнєве легування	Напиленням	–	CrB, SiC, Mo	–	–	–	–	–	70
Підвищення стійкості деталей машин боруванням поверхні виливка	На поверхні форми	3	Суміш бору	–	–	–	Сталь	390HV	71
Поверхнєве легування сталевих виливків ванадієм	На поверхню форми	До 40	Карбіди ванадію	–	–	–	Сталь 110Г13Л	Підвищує зносостійкість	71



При заповненні рідким металом форми з легувальним покриттям тонкий шар останнього перетворюється в рідкий метал, але головна його маса тільки нагрівається до високої температури, внаслідок чого починають діяти дифузійні процеси проникнення легувальних елементів, які знаходяться в обмазці, в поверхневий шар виливка. Перша частина процесу поверхневого легування здійснюється дуже швидко (максимально 10 с), в той час як дифузія елементів, особливо в твердому стані, є тривалим процесом. Через це вона може бути корисною у випадку отримання легованого шару значної товщини (10...15 мм), особливо при виробництві товстостінних виливків.

В роботах [81, 82] дифузійним процесам при насичені поверхневих шарів виливків легувальними елементами відводиться важлива роль. Проте за основу процесу поверхневого легування прийнято плавлення матеріалу покриття. Покриття форми, що розплавляється, взаємодіє з твердою кіркою основного металу, утворює розплав, який згодом розплавляє кірку, внаслідок чого і відбувається легування поверхні.

Аналізуючи взаємодію металу з легувальним покриттям автори роботи [79] стверджують, що температура залитого сплаву повинна бути достатньо високою, щоб відбулося розплавлення покриття під дією тепла рідкого металу. Товщина легованого шару залежить в цьому випадку від хімічного складу покриття та його товщини. Концентраційна неоднорідність в легованому шарі призводить до розвитку дифузійних процесів [79]. Проте до повного вирівнювання концентрації легувальних елементів дифузія не призводить внаслідок короткого часу перебування легованого шару в рідкому стані або за високих температур. Вирівнювання концентрації легувальних елементів по товщині шару відбувається, в основному, внаслідок механічного змішування залитого рідкого металу з компонентами покриття.

Проте можна вважати, що такий механізм легування внаслідок механічного змішування розплавлених елементів покриття в основному рідкому металі приводить більше не до поверхневого, а до об'ємного легування виливка. Крім того, вирівнювання концентрації легувальних елементів після механічного змішування

також не може здійснюватись у повній мірі внаслідок короткотривалості процесу легування.

За припущенням авторів [58] вирівнюванню концентрації легувальних елементів по товщині легованого шару, сприяє газоутворення в легувальному покритті. Проте така точка зору щодо вирівнювання концентрації легувальних елементів в шарі не зовсім коректна, оскільки покриття перед заливанням основного сплаву добре висушується або навіть прожарюється. Крім того, якби було значне відокремлення газів, то воно призвело б до утворення газових раковин в легованому шарі. Практика цього не підтверджує.

За Бергом П.П. [83] процес поверхневого легування може здійснюватись двома шляхами: наварюванням на поверхню вилівка певного шару, коли здійснюється розплавлення легувального покриття, і дифузією, коли кристалеві ґратки легувального елемента і основного металу близькі за параметрами, тобто, мають майже однаковий атомний радіус. Проте цим шляхом одержувати леговану поверхню необхідної товщини значно важче, оскільки процес дифузії тривалий, а час знаходження поверхні вилівка в умовах високих температур незначний.

Можна вважати, що висновки цієї роботи достатньо правдиві, проте не враховується той факт, що при поверхневому легуванні виливків має місце фільтрація рідкого розплаву в капілярно-пористі тіла, якими є легувальні покриття. Фільтрація може початися після нагрівання поверхні форми до температур, близьких до температури нульової рідкотекучості основного сплаву, і останній ще має достатню високу рідкотекучість, щоб проникнути в пори покриття форми.

Дещо інші пояснення механізму поверхневого легування викладені в роботі [70]. За твердженнями авторів цієї роботи, різниця температур плавлення основного металу і матеріалу покриття повинна складати 450...500 °С.

Рідкий метал, торкаючись покриття, яке являє собою поруване тіло, проникає в нього на незначну глибину. Просочений основним металом шар розплавляється і розчиняється під дією тепла залитого розплаву. При цьому охолоджується шар рідкого металу, що прилягає до покриття, і утворюється тверда кірка основного металу. Розплавлена частина легувального покриття, що відокремлена від утвореної кірки основного металу, починає проникати далі в прогріті шари пок-

риття, залишаючись більш рідкотекучою у порівнянні з залитим металом. Одноразово з боку затверділої кірки основного металу утворюється шар розплавленого покриття. Нові шари покриття розплавляються послідовно із зміною складу в бік підвищення концентрації легувального елемента. Утворений при цьому шлак спливає через вузький зазор між кіркою металу і формою або відтісняється до її поверхні. Дифузійні процеси, на думку авторів, не мають вирішального значення і не відображають сутність поверхневого легування.

Представлений механізм є винятковим випадком процесу поверхневого легування виливка. При цьому авторами не враховується взаємодія розплавленого покриття форми з основним металом виливка, який твердіє.

Останнім часом вивченню процесів поверхневого легування у формі приділяють більше уваги, а тому з'явилися і нові уявлення щодо механізму цього процесу.

Михайлов А.М. [84] вважає, що необхідною умовою утворення легованого шару є тривалий контакт основного металу в рідкому стані з легувальним покриттям. Провідним процесом формування легованого шару є: розплавлення, розчинення легувального покриття і фільтрація основного металу. Роль дифузії зводиться до утворення перехідної зони і перерозподілу легувальних елементів в локальних об'ємах. Автор вважає, що одержання якісного легованого шару на сталевих виливках можливе тільки в тому випадку, коли використовується легувальне покриття, яке утворює шар з температурою плавлення нижчою, або такою, як температура тверднення основного металу.

На відміну від наведених вище робіт Вейник А.М. і Волков Ю.А. [85, 86] вважають, що основними в процесі поверхневого легування є ефект змочування легувального покриття основним металом виливка і термофільтраційний режим покриття. У випадку незмочування покриття металом виливка процес легування гальмується і легувальне покриття тільки спікається. Згодом це покриття сколюється з поверхні виливка. Взаємодію металу з легувальним покриттям автори розділяють на три окремих випадки:

Перший випадок відповідає умовам, коли матеріал легувального покриття має меншу температуру плавлення, ніж матеріал виливка; другий – коли покриття

більш тугоплавке, ніж матеріал виливка і третій – коли температура плавлення легувального покриття і матеріалу виливка однакові.

Автори [70...73] вважають, що в усіх випадках основну роль в процесі легування відіграють процеси фільтрації рідкої фази металу виливка в пори легувального елемента.

За умови змочування матеріалу покриття, воно просочується рідким металом виливка на всю глибину, і кристалізація утвореного легованого шару починається з поверхні виливка. В цьому випадку дефекти в легованому шарі практично відсутні. Для якісного змочування рідким металом виливка матеріалу покриття в його склад рекомендується вводити поверхнево-активні речовини (флюси).

Механізм впливу флюсів на процес змочування визначається по-різному: одні обмежують роль флюсів очищенням поверхні твердого металу від оксидів і забруднень [72], а інші стверджують, що флюси насамперед зменшують поверхневий натяг розплавленого металу. На поверхні металу, крім оксидів, знаходяться адсорбовані шари газових молекул, сліди жирових забруднень і інше, що знижує вільну енергію поверхні твердого тіла. Якщо в склад флюсу входять компоненти, які мають сильні відновлювальні властивості, то такий флюс, очищаючи поверхню твердого металу від оксидів, підвищує поверхневий натяг і цим покращує змочування його розплавом [73].

Під час взаємодії рідкого металу з твердими матеріалами поверхні флюс сприяє очищенню від оксидів. Але покращення змочування зв'язано не тільки з підвищенням поверхневого натягу твердої поверхні, але і зі зменшенням міжфазного натягу при видаленні оксидів, що утворюються між покриттям і рідким металом. При цьому утворюються однорідні металічні зв'язки. Так трактується роль флюсів в останніх роботах [75].

За результатами робіт [87] найбільш сприятливий вплив на процес поверхневого легування справляють такі флюси: бура ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ), хлористий натрій ( $\text{NaCl}$ ), борна кислота ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) і їх суміш в співвідношенні 1:1:1.

Слід зазначити, що процеси фільтрації не в усіх випадках будуть мати основне значення при поверхневому легуванні. Наприклад, використання легованих покриттів з температурою плавлення значно нижчою температури кристалізації

основного металу останній використовується з невеликим перегрівом. У цьому випадку, можливо, основне значення буде мати ефект плавлення легувального покриття і його хімічна та дифузійна взаємодія з основою, яка незмінюється.

Як відомо, фільтрація і плавлення пов'язані з тепловими явищами, які суттєво впливають на агрегатний стан речовини і визначають напрямлення протікання відповідних процесів. Теплові ефекти поверхневого легування вивчалися в роботах [40...45], для випадку, коли здійснюється фільтрація основного металу в пори легувального покриття. Теплова взаємодія основного металу майбутнього виливка з легувальним покриттям ливарної форми може визначати, яким шляхом буде здійснюватись процес легування: через фільтрацію чи через плавлення і дифузійні процеси [70].

Аналізуючи літературні джерела, Тихий В.А. [73] запропонував два механізми процесу поверхневого легування:

1. Якщо температура плавлення покриття нижча температури тверднення основного металу, то утворення легованого шару здійснюється внаслідок розплавлення покриття і його взаємодії з основним металом.

2. Якщо температура плавлення легувального покриття вища температури плавлення основного металу, то легований шар може формуватися внаслідок проникнення основного металу в пори покриття з подальшими дифузійними процесами переносу легувальних елементів із покриття в основу металу.

### **1.6.2 Технологія поверхневого легування**

Вітчизняними і зарубіжними вченими використовувались різні способи введення легувальних елементів в поверхневий шар виливка. Одні із них [88] наносили на поверхню форми спеціальні фарби або пасти, виготовляли вставки, основу яких складали відповідні легувальні елементи; другі – на поверхні ливарної форми насипали шар порошкоподібних феросплавів [89]; треті – вводили легувальні елементи в фарби або пасти, основу яких складали вогнетривкі матеріали [90]; четверті [91] – покриття для легування поверхневого шару виливків готували на основі оксидів, карбідів, нітридів і інших сполук легувальних елементів,

які після здійснення дисоціації або інших процесів переходили в поверхневий шар виливка.

Аналіз літературних даних показує, що одним із найбільш поширених дефектів у легувальному шарі є раковини. Щодо механізму їх утворення існують різні тлумачення. Появу відкритих раковин в легованому шарі автори роботи [92] пояснюють так: після розплавлення легувального покриття основний метал і легований шар деякий час знаходяться в рідкому стані, загальна кристалізація металу починається не з поверхні виливка, а на деякій відстані від неї, внаслідок більш високої температури початку твердіння легованого шару. Через це гази, особливо водень, проникають в легований шар і утворюють в ньому газові раковини.

Внаслідок нагрівання форми виокремлення газів починається раніше, ніж починається кристалізація металу. Проте, як загально відомо, зі зниженням температури металу розчинність газів в ньому знижується, і їх потік у формі, направлений від поверхні виливка до зовнішньої поверхні форми, зростає.

Тому такий характер утворення раковин в легованому шарі нереальний.

Автори роботи [91] механізм утворення раковин пояснює тим, що розплавлений легований шар як би втягується в виливок через капілярно пористу кірку основного металу внаслідок об'ємної усадки останнього. Це явище в багатьох випадках є більш реальною причиною утворення раковин.

Такий механізм утворення раковин наводиться і в роботах [27, 30].

Різні пояснення причин, що призводять до виникнення дефектів у поверхневому легованому шарі, вказують на необхідність досконалого вивчення умов їх утворення та пошуку заходів для їх попередження.

За ствердженнями авторів [70, 73] здійснити поверхнєве легування чавунних виливків важче, ніж сталевих оскільки температура кристалізації чавуну значно нижча, ніж сталі, а температура плавлення легувальних покриттів, як правило, вища за температуру заливання чавуну перед заливанням його у форму. Автори пропонують легувати чавунні виливки використанням метало-термічних сумішей.

Незважаючи на недостатнє вивчення процесів поверхневого легування, в літературі є дані щодо використання цього методу для виготовлення реальних промислових литих деталей.

На підвищення зносостійкості лемешів поверхневим легуванням вказують автори [92]. Для отримання легованої поверхні виробу на дно ливарної форми, до заливання її металом, насипали в сухому вигляді легувальну гранульовану шихту шаром товщиною 2...3 мм. Внаслідок змочування шихти металом і взаємодії її з розплавом здійснюється поверхнєве легування.

Автори [93] приводять дані щодо поверхневого легування виливків сіркою. Розплавлена сірка наносилась на поверхню форми пульверизатором. Під час заповнення форми рідким металом здійснюється його взаємодія з сіркою. Основний метал на значну глибину збагачується сіркою внаслідок дифузії і конвекції.

Задовільні результати були отримані після насичення поверхні вушок траків хромом, карбідом хрому і корундом [94]. Стрижні, які утворюють отвір вушка, перед установкою в форму фарбували легувальною фарбували, до складу якої входили ці компоненти.

З метою підвищення зносостійкості відвалів змішувачів було використано екзотермічний метод поверхневого легування [94]. В легувальне покриття вводилися компоненти для здійснення термічної реакції і легувальні добавки FeCr, CrB<sub>2</sub>, FeW, FeMo.

Поверхнєве легування котків для гусеничних тракторів здійснювалось марганцем [74]. Для легування використовували легувальне покриття такого складу: феромарганець – 47%; графіт – 14%; шамот – 35%; сульфатний луг – 4%. Легований шар поверхні виливка досягав товщини 1,5...2,0 мм.

Михайловим А.М. [84] запропоновано метод поверхневого легування для підвищення зносостійкості зубів ковша екскаватора, кришки коліна бетонопроводу і литих деталей насосів для перекачування піску.

Спосіб поверхневого легування використовували для нанесення захисних і декоративних покриттів на поверхню виливка [76]. Для цього використовували такі покриття: порошок Ni – 75 мас. ч., вода – 24...25 мас. ч., метилцелюлоза – 10 мас. ч. Легувальне покриття наносять на внутрішню поверхню форми або на стрижень у вигляді пасти або фарби.

Як відзначалось вище, широкого застосування процес поверхневого легування в промислових умовах може набути, в основному, внаслідок використання способу нанесення легувального покриття на поверхню форми або стрижня. Проте існують інші технології поверхневого легування.

Автори роботи [95] запропонували спосіб поверхневого легування чавунних виливків алюмінієм шляхом заливання в ливарну форму алюмінію, деякого його витримування у формі до утворення алюмінієвої оболонки з подальшим зливанням надлишку алюмінію із форми. В одержану форму з оболонкою заливають рідкий чавун.

В роботі [73] описано спосіб місцевого зміцнення окремих частин виливка шляхом установа в потрібних місцях легувальних матеріалів у вигляді пластинок товщиною 0,10...0,15 мм, стрижнів або спіралей. Автором роботи запропоновано таку технологію: з метою одержання форми з більш міцною активною легувальною поверхнею, на гарячу модель наноситься легувальна суміш, яка вмістить пульвербакеліт або інші термоактивні смоли. Легувальний шар засипається термоактивною сумішшю, і утворюється оболонкова форма за звичайним способом.

### **1.6.3 Кінетика поверхневого легування**

Процес поверхневого легування може здійснюватись:

- використанням легкоплавких легувальних покриттів, температура плавлення яких нижча, ніж температура плавлення основного металу;
- використанням тугоплавких покриттів, температура плавлення яких вища, ніж основного металу.

Розглянемо кінетику поверхневого легування.

Використання легкоплавких легувальних покриттів для процесів поверхневого легування з точки зору механізму можна представити так [70]:

Після заповнення рідким металом ливарної форми з нанесеним легувальним покриттям на її поверхні утворюється тверда кірка основного металу, яка має невисоку міцність, а тому під дією металостатичного напору може прогинатися в бік покриття, оскільки останнє під дією тепла металу встигає нагрітись до високої температури і втрачає міцність. Коли кірка стає достатньо товста, її прогинання зупиняється. Це прогинання кірки компенсує повністю або частково об'ємну усадку (з урахуванням об'ємних пор) матеріалу покриття при його плавленні. Прогинання пояснюється відомий факт отримання легованого шару без раковин. Під



дією металу основи покриття плавиться і взаємодіє з ним, при цьому розчиняє тверду кірку за механізмом розчинення тугоплавких компонентів.

Спочатку розчинення покриття здійснюється внаслідок дифузії атомів останнього в кірку основного металу і навпаки. В результаті цього на межі фаз утворюється легкоплавкий сплав, який переходить (при певних концентраціях) в рідкий стан, отже здійснюється розчинення рідким покриттям твердої кірки основного металу. Чим більша різниця температур основного металу і покриття, тим більш тривалий час здійснюється взаємодія між ними (рідким покриттям і твердим або твердо- рідким основним металом) на межі їх розділу, тим більше основного металу перейде в межовий розплав і тим в більшій мірі знизиться вміст легувальних елементів в покритті.

Вирівнювання концентрації легувальних елементів по перерізу легованого шару здійснюється внаслідок конвективного перемішування. Дифузія елементів із покриття в основний метал і із виливка в шар обмежена, але вона призводить до розчинення твердої кірки, утворення перехідної зони і міцного зчеплення легованого шару з основним металом виливка.

При використанні тугоплавких компонентів, внаслідок значного перегрівання основного металу на початку процесу, кірка на поверхні виливка не утворюється, тепла основного металу достатньо, щоб розігріти легувальне покриття до температури, яка сприяє проникненню основного металу в пори легувального покриття. Такий процес легування можна порівняти з механізмом утворення механічного пригару. Рідкий метал, маючи феростатичний тиск, перевищує капілярний (якщо кут змочування більший  $90^\circ$ ) і проникає в пори легувального покриття. Глибина проникнення рідкого металу до затверднення головної його маси тим більша, чим більший розмір пор в покритті і тиск металу, і чим менша охолоджувальна здатність покриття. Якщо кількість тепла, яка поступає від виливка до легувального покриття, перевищує кількість тепла, яке забирає ливарна форма, то частина легувального покриття може розчинятися, і таким чином здійснюється подальше проникнення рідкого металу у покриття. Проникання металу буде тривати до тих пір, поки кількість тепла, підведена до межі розділу легувальне покриття – основний метал не стане рівним або меншим, ніж кількість тепла, яку може відвести форма від цього розділу. Рідкий метал в порах легувального покриття почне взаємодіяти з зернами покриття і розчиняти їх (за механізмом розчинення рідким

металом тугоплавких складових). В цьому випадку велику роль в вирівнюванні хімічного складу по перерізу легувального шару відіграють дифузійні процеси, величина зерна і пористість легувального покриття.

Коли для поверхневого покриття використовують легувальні компоненти, температура плавлення яких трохи нижча або вища температури кристалізації основного металу вилівка, то процес легування може здійснюватись або внаслідок розплавлення покриття, або внаслідок проникнення основного металу в пори легувального покриття або одночасно здійснюються обидва процеси. Все залежить від температури перегрівання рідкого металу і різниці температур плавлення покриття і основного металу.

Легуючі елементи за температурою плавлення можна розділити на легкоплавкі і тугоплавкі. Якщо температура плавлення елементів нижче температури розплаву, в який вони додаються, то такі елементи слід віднести до легкоплавких, якщо ж їх температура плавлення вище температури розплаву, то вони є тугоплавкими. У першому випадку має місце відносно швидкий процес плавлення, а в другому – значно більш повільний процес розчинення елементів. У зв'язку з тим, що температура розплаву при сталеплавильних процесах зазвичай становить 1550...1600 °С, такі елементи як хром, молібден, вольфрам, ванадій, титан, ніобій, цирконій і бор відносяться до тугоплавки. На їх розчинення витрачається чимало часу. Застосовувані для легування промислові феросплави зазвичай мають більш низьку температуру плавлення, ніж найбільш тугоплавкі їх компоненти. Введення в залізо легуючих елементів супроводжується зниженням температури плавлення сплавів, що утворюються незалежно від температури плавлення елементів, що вводяться (табл. 1.5).

Густина легуючих елементів знаходиться в широких межах: від 1530 для кальцію до 19260 кг/м<sup>3</sup> для вольфраму. Присадки в сталь легуючих елементів, густина яких значно відрізняється від її густини, супроводжуються підвищеною втратою цих елементів. Легкі елементи плавляться на поверхні розплаву, а важкі – на поверхні футерівки. При цьому важкі елементи проникають в футеровку печі, а легкі – інтенсивно взаємодіють з оксидами шлаку і атмосферними газами, що призводить до їх окислення і насичення розплаву воднем і азотом. Особливі труднощі викликає легування сталі елементами з відносно низькими густиною і тем-

пературою кипіння (кальцій, магній). Їх засвоєння розплавом з цих причин є мінімальним.

Значення коефіцієнтів активності при розчиненні деяких елементів в рідкому залізі (1% -ний розчин) [96] наведені в табл. 1.6.

Коефіцієнти активності елементів в багатокомпонентних розчинах визначаються методом К. Вагнера за значеннями параметрів взаємодії.

Розчинення в залізі елемента і супроводжується зміною вільної енергії розчину:

$$\Delta G^0 = RT \ln a_i = 4,575 T \lg(N_i \gamma_i), \quad (1.1)$$

де  $R$  – газова стала;

$T$  – абсолютна температура, К;

$a_i$  – активність елемента  $i$  в розчині;

$N_i$  – молярна частка елемента  $i$ ,

$\gamma_i$  – коефіцієнт активності  $i$ .

Якщо розчин підпорядковується закону Рауля, то  $\gamma_i = 1$ ;  $a_i = N_i$  і  $\Delta G^0 = 4,575 T \lg N_i$ .

Коефіцієнт активності ( $i_1, i_2, i_3, \dots$ ) одного з елементів розчину можна виразити у вигляді добутку приватних коефіцієнтів активності, що враховують вплив всіх інших компонентів:

$$\gamma_i = \gamma_{i_1}^{i_1} \gamma_{i_1}^{i_2} \gamma_{i_1}^{i_3} \dots$$

Цей вираз після логарифмування набуває вигляду

$$\lg \gamma_{il} = \lg \gamma_{i_1}^{i_1} + \lg \gamma_{i_1}^{i_2} + \lg \gamma_{i_1}^{i_3} + \dots \quad (1.2)$$

Окремі коефіцієнти активності можна замінити параметрами взаємодії. Параметр взаємодії  $e$ , рівний похідній від приватного коефіцієнта активності по концентрації

$$e_{i_1}^{i_1} = \frac{\partial \lg \gamma_{i_1}^{i_1}}{\partial [i_1]}; e_{i_1}^{i_2} = \frac{\partial \lg \gamma_{i_1}^{i_2}}{\partial [i_2]}; e_{i_1}^{i_3} = \frac{\partial \lg \gamma_{i_1}^{i_3}}{\partial [i_3]} \dots \quad (1.3)$$

показує вплив концентрації елемента на коефіцієнт активності. З певним наближенням (для невисоких концентрацій) можна прийняти, що  $e \approx \text{const}$ . Тоді

$$\lg \gamma_{il} = \gamma_{i_1}^{i_1} [i_1]; \lg \gamma_{i_1}^{i_2} [i_2]; \lg \gamma_{i_1}^{i_3} [i_3]; \dots \quad (1.4)$$

Зниження температури плавлення сплавів при введенні в залізо легуючих елементів

Легуючий елемент	Концентрація легуючого елемента, %*	Середнє зниження температури плавлення сплаву на 1% легуючого елемента,	Легуючий елемент	Концентрація легуючого елемента, %*	Середнє зниження температури плавлення сплаву на 1% легуючого елемента,
Mn	85	3,4	Nb	20	8,7
Ni	50	1,9	Ti	15	13
Si	20	16	V	30	2,1
Co	30	1,3	W	15	0,7
Mo	35	2,4	Cr	25	1,6
			C	4	88

\* До зазначеної концентрації спостерігається монотонне зниження температури плавлення сплавів.

Таблиця 1.6

Значення коефіцієнтів активності при розчиненні деяких елементів в рідкому залізі [58]

Елемент, стан	Густина при температурі 1500 °C
Al <sub>ж</sub>	0,063
V <sub>тв</sub>	0,18
W <sub>тв</sub>	1
Co <sub>ж</sub>	1
Si <sub>ж</sub>	0,0011
Mn <sub>ж</sub>	1
Mo <sub>тв</sub>	1
Ni <sub>ж</sub>	0,66
Ti <sub>тв</sub>	0,011
Cr <sub>тв</sub>	1
Zr <sub>тв</sub>	0,011

Підставляючи ці значення в логарифмічне рівняння похідної окремі коефіцієнтів активності, отримуємо наступне рівняння для розрахунку коефіцієнтів активності за допомогою параметрів взаємодії:

$$\lg \gamma_{i1} = \gamma_{i1}^{i_1}[i_1] + \gamma_{i1}^{i_2}[i_2] + \gamma_{i1}^{i_3}[i_3] + \dots \quad (1.5)$$

Значення параметрів взаємодії визначені експериментально і розрахунковим шляхом для багатьох металургійних систем.

Параметри взаємодії можуть мати позитивні і негативні значення. Відповідно до останнього рівняння позитивні значення параметрів взаємодії збільшують  $\gamma_{i1}$  і тим самим зменшують розчинність елемента  $i_1$ . В цьому випадку переважають сили хімічного зв'язку між залізом і компонентами розчину  $i_2, i_3, \dots$ . Негативні значення параметрів взаємодії зменшують значення  $\gamma_{i1}$  отже, збільшують розчинність елемента  $i_1$  в залізі внаслідок переважання сил зв'язку елементів  $i_2, i_3, \dots$  з елементом  $i_1$ .

## 1.7 Висновки і постановка завдання досліджень

На основі літературного огляду можна зробити такі висновки:

1. Найбільшу зносостійкість мають сплави на основі заліза, леговані такими елементами як марганець, хром, титан, бор, молібден, нікель та інші, а жаростійкість – хромисті і хромоалюмінієві сталі.
2. Для роботи в умовах ударно-абразивного зношування кращими матеріалами є сталі з підвищеним вмістом Mn (в основному це сталь 110Г13Л, та її похідні).
3. Найбільш поширеними зносостійкими сплавами на території країн СНД є високохромисті чавуни у зв'язку з їх високою стійкістю в різних умовах експлуатації. Найкращим серед них з технологічної і експлуатаційної точок зору є ІЧ260Х28Н2.
4. Підвищення зносостійкості і жаростійкості литих деталей можна досягти поверхневим легуванням їх безпосередньо в ливарній формі.
5. Наповнювачами легувальних покриттів можуть бути використані чисті метали, феросплави, лігатури або механічні суміші на їх основі: для жаростійкого

легування: хром, ферохром різних марок, алюміній, титан, феросиліцій, для зносостійкого – марганець, феромарганець різних марок, ферохром високовуглецевий, феротитан феробор та ін.

6. Процеси поверхневого легування, впливу легувальних елементів на властивості поверхневого шару, рецептура покриттів для поверхневого легування виливків, а також технології нанесення цих покриттів на поверхні форм і стрижні вивчені недостатньо і потребують глибокого дослідження.

**Мета дослідження.** Метою роботи є розроблення наукових і технологічних принципів диференціації спеціальних властивостей металу у виливках відповідального та особливо відповідального призначення з підвищенням експлуатаційної надійності та довговічності роботи машин і механізмів.

**Виходячи із вище викладених висновків, в роботі поставлено такі завдання:**

1. Розробити методики дослідження процесів поверхневого легування та виготовлення виливків із диференційними спеціальними властивостями поверхні, зокрема, із високими зносостійкістю та окалинотійкістю.

2. Науково обґрунтувати й вибрати хімічні елементи для зносостійкого та жаростійкого поверхневого легування виливків у ливарній формі.

3. Вивчити вплив гранулометричного складу наповнювача легувального покриття на процеси утворення й товщину легованого шару та визначити оптимальні межі легувальних компонентів.

4. Дослідити зміну структури, твердості металу та мікротвердості структурних складових легованого шару залежно від хімічного та гранулометричного складу наповнювачів для зносостійкого й жаростійкого поверхневого легування.

5. Визначити оптимальний хімічний й гранулометричний склад наповнювачів й зв'язувальних компонентів для зносостійкого й жаростійкого легування виливків.

6. Розробити технологічні процеси та інструкції для виготовлення виливків з потрібними диференційними спеціальними властивостями поверхні.

7. Запропонувати конкретні рекомендації щодо особливостей виготовлення виливків з диференційними властивостями поверхні у виробничих умовах.

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

#### **2.1 Вихідні матеріали для виготовлення виливків методом поверхневого легування**

Як повідомлялось раніше, найбільш перспективними легувальними елементами, що підвищують зносостійкість залізовуглецевих сплавів, є марганець, хром, титан і бор, а жаростійкості – хром, алюміній, кремній, титан, РЗМ.

Оскільки чисті метали мають високу ціну та здебільшого високі температури плавлення, для приготування легувальних покриттів використовували феросплави та механічні суміші на їх основі.

Первинні матеріали для приготування легувальних покриттів наведено в табл. 2.1, а механічні суміші компонентів – в табл. 2.2.

Необхідно вказати, що використання матеріалів для легувального покриття з виплавлених лігатур не дало позитивних результатів, оскільки їх подрібнення до необхідних фракцій утруднено, тому використовували феросплави, які подрібнюються задовільно. Подрібнення феросплавів здійснювали в металевій ступці. Одержані порошки прожарювали за температур 200...250 °С і розсівали на фракції через сита відповідно вимогам ГОСТ 29234.3-91. Розсіяний на фракції матеріал використовували для приготування легувальних покриттів самостійно або у вигляді механічних сумішей.

З метою одержання максимально гомогенного складу сумішей змішування окремих компонентів здійснювали в лабораторному млині.

На підставі аналізу літератури та беручи до уваги власні попередні дослідження при визначенні складу сумішей враховували той факт, що вміст легувальних елементів вилівка у легованому шарі знижується більш ніж в два рази порівняно з їх вмістом в легувальному покритті.

Для підготовки легувального покриття використовували фракції певних компонентів або їх сумішей: <02; 02; 0315; 04; 063; 1.

Для легування в порожнині ливарної форми використовували марганець металевий Мн965 та алюміній фракцій 04; 063; 1; 1,5.

## **2.2 Виплавляння основного сплаву**

Як основний сплав використовували середньовуглецеву сталь 30Л (ДСТУ 8781:2018). Хімічний склад сталі та її властивості наведено в таблиці 2.3.

Сплав виплавляли використовуючи індукційну піч ICT-0,06 з ємністю тигля 60 кг і кислою футеровкою. Живлення індуктора печі здійснюється від машинного генератора частотою 2500 Гц. Сталь виплавляли методом переплаву при використанні низьковуглецевого сталевих брухту та переробного чавуну чи чавунного брухту.

На передодні випускання сталі із печі її перегрівали до  $1600 \pm 10$  °С. Температуру визначали за використання вольфрам-ренієвої термопари з кварцовим наконечником безпосередньо в печі (після її вимкнення) та в ковші.

Ківш перед заливанням підігрівали до температури 650...700 °С в камерній печі. Це дозволило суттєво знизити втрати тепла, яке поглинається ковшом. Розливання основної сталі здійснювали за температури  $1560 \pm 10$  °С.

## **2.3 Розроблення зразків для дослідження процесів поверхневого легування**

На підставі аналізу геометрії та розмірів литих деталей, які піддаються інтенсивному зношуванню, встановлено, що середня товщина стінок виливків знаходиться в межах 30...40 мм. Тому для вивчення процесів поверхневого легування вибрано зразки з секціями розмірами 85×35×40 мм. Блок зразків наведено на рис. 2.1.



Таблиця 2.1

## Вихідні матеріали для приготування легувальних покриттів

Інд. поз	Найменування матеріалу	Марка	ДСТУ, ГОСТ, ТУ	Хімічний склад, %						Призначення матеріалу
				основного компоненту	C	Si	P	S	інші елементи	
1	Марганець металевий	Мн965	6008-90	$\geq 96,5$	$\leq 0,1$	$\leq 0,8$	$\leq 0,05$	$\leq 0,05$	–	Підвищує зносостійкість
2	Феромарганець	ФМн1,5	4755-80	85...95	$\leq 1,5$	$\leq 2,0$	$\leq 0,03$	$\leq 0,02$	–	Так само
		ФМн78А		78...82	$\leq 7,0$	$\leq 2,0$	$\leq 0,05$	$\leq 0,03$	–	Так само
3	Ферохром	ФХ650А	4757-89	$\geq 65$	$\leq 6,5$	$\leq 2,0$	$\leq 0,03$	$\leq 0,06$	–	Підвищує жаростійкість і зносостійкість
		ФХ800А		$\geq 65$	$\leq 8,0$	$\leq 2,0$	$\leq 0,03$	$\leq 0,06$		
4	Феротитан	ФТи30А	4761-80	$\geq 30$	$\geq 0,15$	$\leq 5,0$	$\leq 0,04$	$\leq 0,04$	Cu $\leq 2,0$ Al $\leq 8,0$ Mo $\leq 0,4$	Підвищує зносостійкість, подрібнює первинне зерно
5	Феробор	ФБ10	14848-69	$\geq 10$	–	7...15	–	–	8...12 Al	Модифікує, легує з метою підвищення зносостійкості
6	Алюміній	А85	11069-71	$\geq 85$	–	$\leq 0,015$	–	–	$\leq 0,002$ Ti	Підвищує жаростійкість
7	Залізний порошок	ПЖР-3	9849-86	$\geq 99,9$	–	–	–	–	–	Наповнювач легувальної суміші

Таблиця 2.2

## Суміші для приготування покриттів та їх хімічний склад

Індекс позиції	Вміст компонентів у суміші, мас.ч						Вміст елементів, розр., %					
	Mn965	ФХ800А	ФТi30А	ФБ10	Залізний порошок	Електро- дний бій	Cr	Mn	C	Ti	P	Fe
1	35	6	15	5	33	4	3,5	33,8	4,10	5,3	0,5	52,80
2	40	6	15	5	27	5	3,5	38,6	5,08	5,3	0,5	47,02
3	45	6	15	5	21	6	3,5	43,4	6,06	5,3	0,5	41,22
4	50	6	15	10	9	8	3,5	48,3	8,02	5,3	1,0	33,88

Примітки: 1. Вміст даних компонентів в механічній суміші близько 2,0% плавикового шпату для утворення флюсу.

2. Залізний порошок використовували в усіх дослідах однієї фракції – 50 мкм.

Таблиця 2.3

## Хімічний склад базової сталі та її властивості

Марка сталі	ДСТУ	Хімічний склад, %					Механічні властивості				
		C	Mn	Si	P	S	σ <sub>T</sub> , МПа	σ <sub>B</sub> , МПа	δ, %	Ψ,%	КСУ,МДж/м <sup>2</sup>
					Не більше		Не менше				
30Л	8781:2018	0,27...0,35	0,45...0,90	0,20...0,52	0,50	0,50	255	471	17	30	343

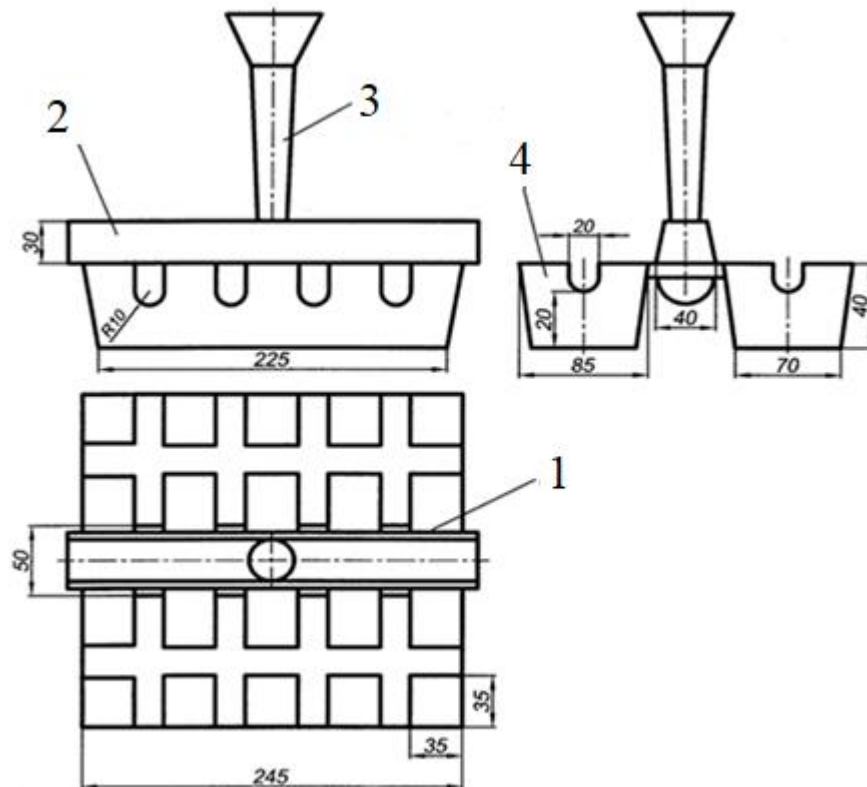


Рис. 2.1. Блок зразків з елементами ливникової системи:

1 – живильник; 2 – шлаковловлювач; 3 – стояк; 4 – блок зразків

На стрижні наносилось легувальне покриття, виготовленне із рідкоскляної суміші (90% піску, 4% бентоніту і 6% рідкого скла).

Розміри стрижневого ящика та стрижня наведено на рис. 2.2 і 2.3.

Після охолодження стрижнів на них наносили легувальне покриття певного складу товщини 3, 4, 5, 6, 7 мм. На кожний стрижень наносили по 5 різних покриттів за складом або товщиною.

Стрижні з нанесеним покриттям протягом доби підсушувались на повітрі, а перед використанням їх прожарювали при температурі 300 °С протягом двох годин.

Форми виготовляли з використанням дерев'яного модельного комплексу і піщано-глинястої суміші для сталевих литва.

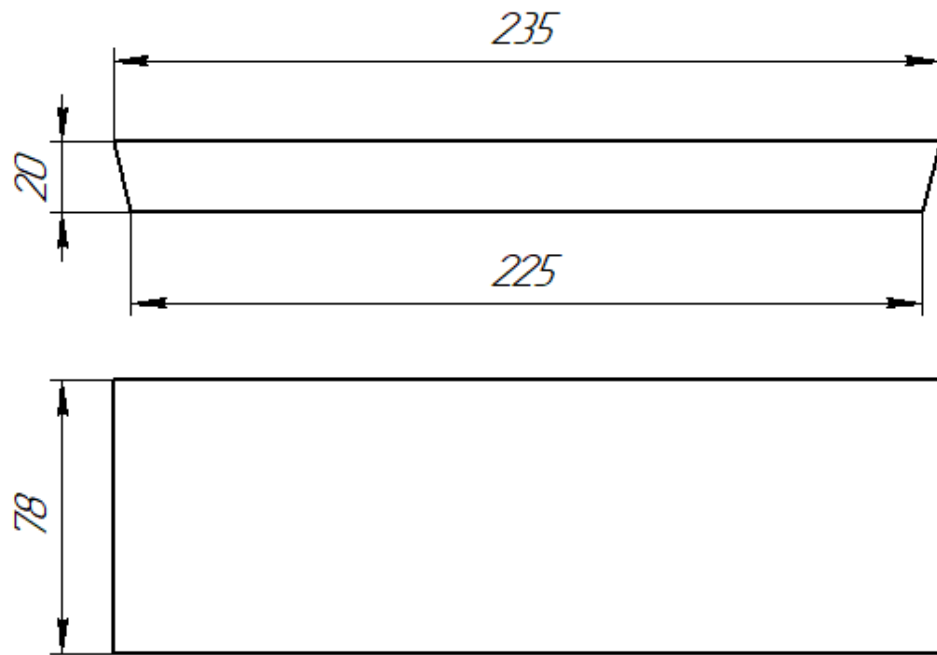


Рис. 2.2. Габаритні розміри стрижня

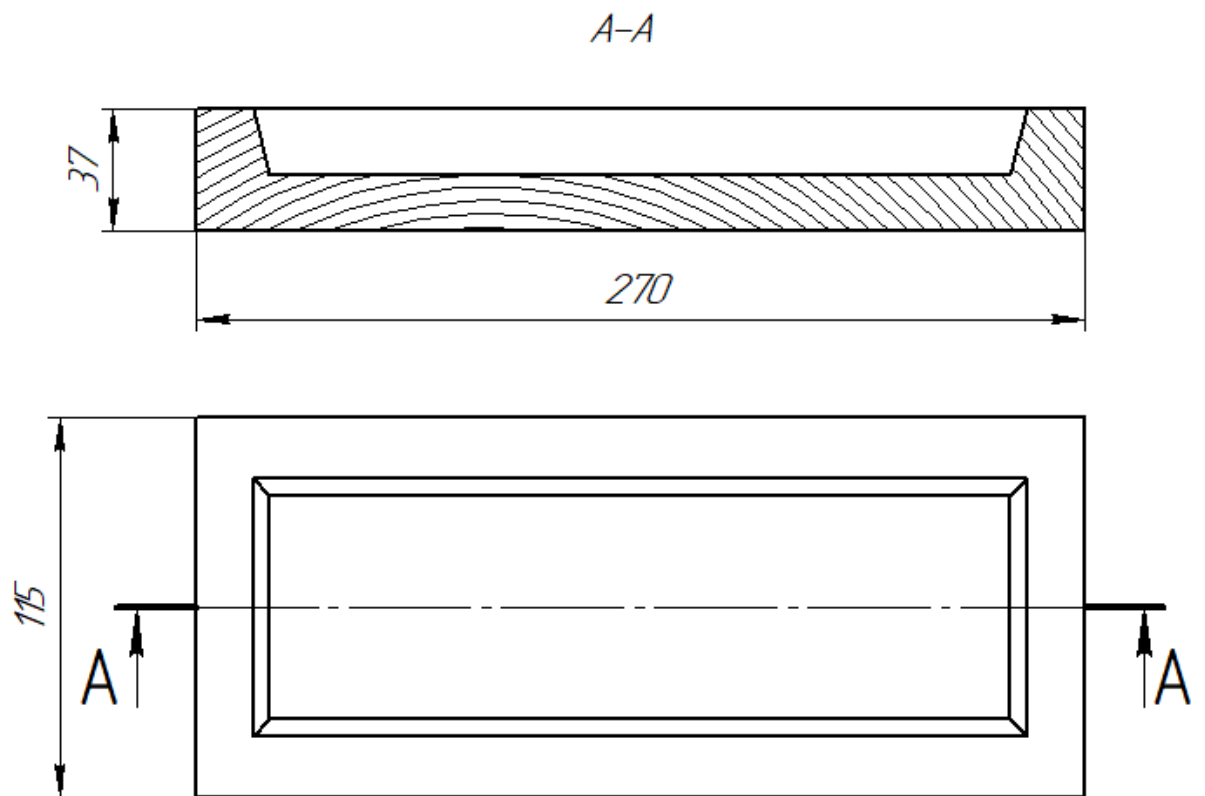


Рис. 2.3. Стрижневий ящик для виготовлення стрижня

Стрижні після виготовлення протягом доби сушилися при кімнатній температурі, а потім у камерній печі при температурі 250 °C на протязі двох годин.

Для запобігання утворенню пригару форми фарбували дистенсиліманітовою фарбою. Для зниження втрат тепла, яке поглинає форма від рідкого металу, здійснювали об'ємне просушування форм у камерній печі при температурі 210...240 °С. Проставлення стрижнів у форми і їх збирання здійснювали безпосередньо за декілька хвилин до заливання металом.

Форму у зібраному вигляді наведено на рис. 2.4.

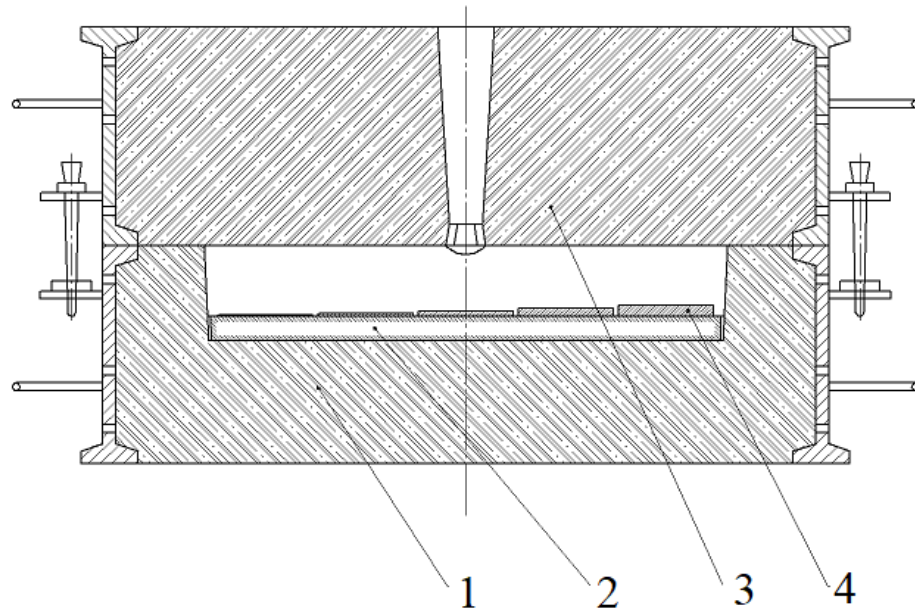


Рис. 2.4 – Ливарна форма для дослідження процесів поверхневого легування: 1 – нижня півформа; 2 – стрижень; 3 – верхня півформа; 4 – легувальне покриття

Після охолодження блоки зразків видаляли із форми, аналізували візуально процеси легування, очищали зразки від пригару, розбивали на частини і здійснювали попереднє оброблення їх на обдирних верстатах.

Технологія виготовлення зразків дозволяє одночасно в одній формі дослідити 3...5 легувальних покриттів.

Для визначення оптимальної швидкості заповнення ливарної форми рідким металом розраховуємо поперечний переріз елементів ливникової системи, для цього використовуємо відому методику Озана – Дітерта, і НТУУ “КПІ”, але з суттєвим коригуванням розмірів [5].

Оптимальну тривалість заливання форми визначаємо за формулою:

$$\tau = S^3 \sqrt{\delta Q}, \quad (2.1)$$

де  $S$  – коефіцієнт часу, визначаємо за таблицею 2.4.

$\delta$  – переважна товщина стінки, мм.

$Q$  – маса металу, необхідна для виготовлення блоку зразків і ливникової системи, кг.

Таблиця 2.4

Значення коефіцієнта  $S$

Рідкотекучість металу	Спосіб підводу металу у форму		
	знизу сифоном в товстостінні частини виливка	на 0,5 висоти або ступінчастий комбінований	зверху рівномірне підведення в тонкостінну частину
Нормальна	1,3	1,4	1,5...1,6
Підвищена	1,4...1,5	1,5...1,6	1,6...1,8

Площа перерізу живильників визначається в залежності від способу заливання металу в форму. При заливанні форм за допомогою носика ковша:

$$F_{\text{жив.}} = Q / \mu \tau \cdot 0,3 \sqrt{H_{\text{ср}}}, \quad (2.2)$$

де  $\mu$  – загальний коефіцієнт опору форми, визначається за таблицею 2.5.

Таблиця 2.5

Значення коефіцієнта  $\mu$

Формування виливка	Опір форми		
	високий	середній	малий
По-сухому	0,3	0,38	0,5
По-сирому	0,25	0,32	0,42

$H_{\text{ср}}$  – середній розрахунковий напір, см.

$$H_{cp} = H_{ст} - h^2/2 h_0, \quad (2.3)$$

де  $H_{ст}$  – висота стояка від рівня воронки до живильника, см.

$h_b$  – висота вилівка від верхньої крайки живильника до найвищої точки вилівка, см.

$h_0$  – загальна висота вилівка в формі, см.

При заливанні зверху,  $h_b=0$ , тоді  $H_{cp}=H_{ст}$ .

При сифонному заливанні форми,  $h_b = h_0$  тоді  $H_{cp} = H_{ст} - h_0/2$ .

При підведенні металу по розніму форми, коли  $h_b = 0,5h_0$ , тоді  $H_{cp} = H_{ст} - h_0/8$ .

З урахуванням специфіки заливання форм (висока швидкість заповнення форми для менших утрат температури металу основи), площі поперечних перерізів колектора,  $F_k$  і стояка,  $F_{ст}$  визначаємо із співвідношення:

$$F_{жив}:F_k:F_{ст}=1,6:1,5:1,0 \quad (2.4)$$

Розраховуємо оптимальну тривалість заливання за формулою (2.1):

$$\tau = 1,55^3 \sqrt{40} = 12,65 \text{ с}$$

де  $S = 1,55$  – вибираємо за таблицею 2.4;

$\delta = 40$  мм – середня товщина вилівка;

$Q = 13,6$  – маса блока зразків з ливниковою системою, кг;

Визначаємо загальну площу перерізу живильників:

$\mu = 0,32$  – вибираємо за таблицею 2.5.

$$H_{cp} = H_{ст} - h_0/8, \quad (2.5)$$

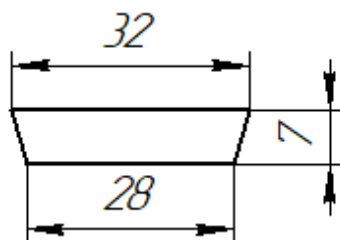
оскільки використовуємо підведення-металу по розніму форми:

$$H_{cp} = 24 - 4/8 = 23,5$$

$$F_{жив} = 13,6/0,32 \cdot 12,65 \cdot 0,3 \cdot \sqrt{23,5} = 21,0 \text{ см}^2$$

Визначаємо  $F_k = 2,8 \text{ см}^2$ ;  $F_{ст} = 3,2 \text{ см}^2$

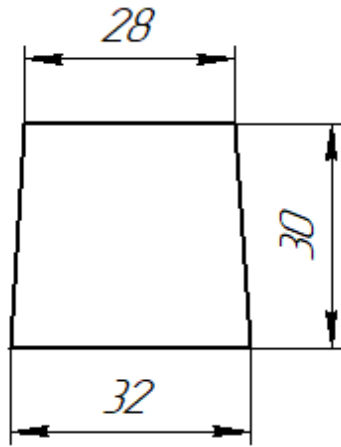
Перерізи елементів ливникової системи:



$$F_{жив} = a + b/2 \cdot h, \text{ см} \quad (2.6)$$

$$F_{жив} = 2,1 \text{ см}^2$$

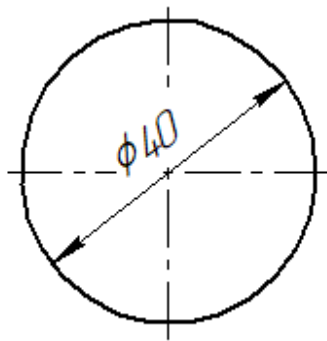
$$N = 10 \text{ шт}, \sum F_{жив} = 21,0 \text{ см}^2$$



$$F_k = a + b/2 \cdot h, \text{ см}^2 \quad (2.7)$$

$$h = 3 \text{ см}$$

$$F_k = 10,05 \text{ см}^2 \quad \Sigma F_k = 20,1 \text{ см}^2.$$



$$F_{\text{ст}} = \pi r^2, \text{ см}^2 \quad (2.8)$$

$$F_{\text{ст}} = 12,56 \text{ см}^2$$

## 2.4 Технологія нанесення легувального покриття

Як відзначалося раніше, для поверхневого легування можна використовувати чотири основних різновиди нанесення на робочу поверхню ливарної форми або стрижня легувальних покриттів:

- з використанням паст та фарб на основі легувальних компонентів;
- засипанням в порожнину ливарної форми порошкоподібних феросплавів або чистих металів і їх лігатур;
- додаванням легувальних елементів до складу фарб, які готуються на основі вогнетривких матеріалів;
- з використанням оксидів, карбідів, нітридів, боридів та інших сполук легувальних елементів, які при певних умовах переходять в поверхневий шар виливка.

Технології нанесення легувальних покриттів також різні: фарби наносять на поверхню форм і стрижнів пензлем або пульверизатором (Додаток Б), пасту



– шпателем, порошкоподібні компоненти – за допомогою сита, металокерамічні вставки – проставляють і закріплюють у формах перед їх заливанням та ін.

Різновиди технології нанесення легувальних покриттів наведено в таблиці 1.4.

Оскільки дана науково-дослідна робота знаходиться на початковій стадії, використовували обмазки, які наносили на стрижні шпателем. Для одержання легувального покриття однакової товщини використовували металеві рамки певних розмірів і різної висоти: 3, 4, 5, 6 і 7 мм (товщини покриттів вибрано на підставі літературних джерел і попередніх власних досліджень).

Як зв'язувальний компонент при приготуванні обмазки використовували рідке скло густиною  $1300 \text{ кг/м}^3$ . Кількість рідкого скла змінювалась в залежності від фракції компонентів: чим менша фракція, тим більше витрачалося рідкого скла (від 3 до 6%).

Перед нанесенням покриття на стрижень поверхню останнього покривали рідким склом для кращого утримання легувального покриття на поверхні стрижня, особливо під час заливання форм рідким металом.

Стрижні з покриттям встановлювали у ливарну форму безпосередньо перед заливанням: вони мали температуру  $150\ldots 200^\circ\text{C}$ .

Для запобігання спливання стрижнів під дією металу їх закріплювали шпильками.

## 2.5 Дослідження температури

Для дослідження процесів, що проходять в середині форми, є необхідність встановити термопари в різних частинах майбутнього вилівка, а саме: між стрижнем та легуючим покриттям, в середині покриття та між легуючим покриттям і основним металом. Схему встановлення термопар показано на рис. 2.5.

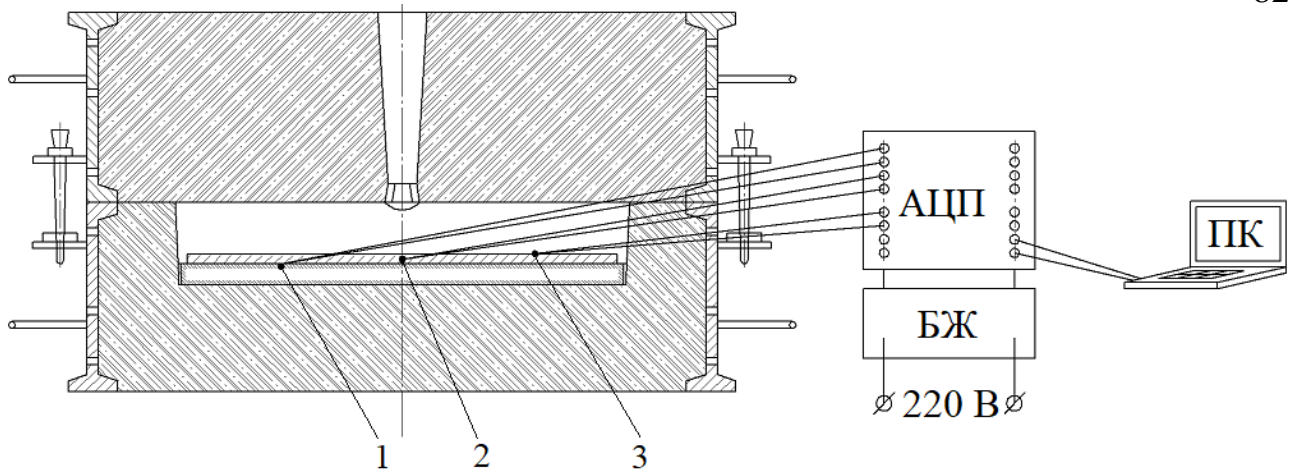


Рис. 2.5. Схема встановлення термопар: 1 – нижня границя в низу покриття стрижень, 2 – середина покриття, 3 – верхня границя покриття – рідкий метал.

## 2.6 Вивчення абразивної зносостійкості

Абразивну зносостійкість визначали аналогічно методиці, описаній в [97], на спеціально сконструйованій установці, схему якої представлено на рис. 2.6.

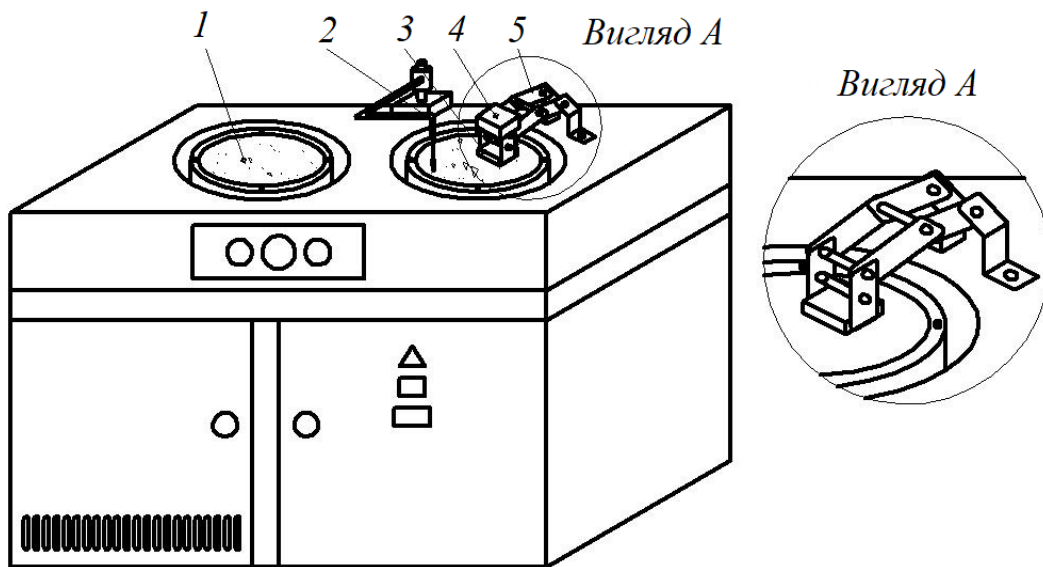


Рис. 2.6. Схема установки для випробувань на абразивну зносостійкість:  
1 – диск з абразивом; 2 – подача води; 3 – зразок; 4 – набір вантажів;  
5 – тримач

Зразок перетином  $15 \times 15$  мм, поміщений в затиск, зношувався торцем на абразивному матеріалі під дією навантаження  $0,44 \text{ Н / см}^2$ . Як абразивний мате-

ріал використовувалося електрокорундове полотно КК18ХW 25Н Білгородського абразивного заводу. Розмір абразивних частинок 320 мкм. Полотно закріплювали на горизонтальному диску діаметром 200 мм. Диск обертався електродвигуном зі швидкістю 960 об/хв.

Зразок в процесі випробувань в радіальному напрямку був нерухомим. Через кожні 15 хвилин випробувань проводилася заміна абразиву. Шлях тертя випробуваного зразка за 15 хвилин становив 6,78 км. В якості критерію зносостійкості брали відносний знос зразків, який визначався за формулою (2.9):

$$\varepsilon = \frac{m_0 - m_i}{m_0} \cdot 100\% \quad (2.9)$$

де  $m_0$  – маса зразка до випробування, г;

$m_i$  – маса зразка після випробування через певний час, м

Масу зразка визначали через кожні 15 хвилин випробувань шляхом зважування зношених зразків на аналітичних вагах з точністю до 0,001 гр.

## **2.7 Дослідження твердості зразків, товщини легувального шару та структури**

Твердість зразків (легованого шару та основи металу) здійснювали на твердомірі ТК-3 відповідно до вимог ГОСТ 9450-76.

Для визначення твердості металу біметалевих виливків використовували прилад Бринеля (діаметр індентора – 10 мм, навантага – 3000 кг).

Товщину легovanого шару і його структуру, а також металу основи визначали на мікроскопі МІМ-8 після травлення шліфів 3-х процентним розчином азотної кислоти.

## **2.8 Методика дослідження процесів структуроутворення в сталях**

Теорією і практикою виготовлення сталевих виливків встановлено, що процеси структуроутворення у литому металі залежать від багатьох факторів.

Для високолегованих сталей із спеціальними властивостями такими факторами є: хімічний склад (кількість легувальних елементів у сталі та їх вміст), швидкість охолодження виливка в ливарній формі залежно від товщини його стінки та теплоакумулювальної здатності ливарної форми, використання процесів мікролегкування та модифікування тощо.

У роботі, як фактор управління структуроутворенням в металевих матеріалах, використано процес мікролегкування високолегованої жаростійкої хромоалюмінієвої сталі титаном.

Титан – активний розкиснювач сталі, з вуглецем утворює високотемпературні дрібнодисперсні карбіди, а з азотом такі ж нітриди. І карбіди, і нітриди титану слугують додатковими центрами кристалізації і суттєво впливають на процеси структуроутворення у високолегованих сталях, подрібнюючи первинне зерно. Одночасно утворені оксиди титану у вигляді мікроплівок збільшують кількість неметалевих включин у металі і підвищують його індекс забрудненості, що погіршує механічні властивості сталі.

Окрім титану в сталі утворюють неметалеві включини і інші хімічні елементи (ендогенні) та такі, що попадають у метал із шихти, футерувальних та формувальних матеріалів і залишаються в ньому (екзогенні).

Ендогенні включини утворюються внаслідок взаємодії хімічних елементів, які входять до складу сталі: з киснем (оксиди), сіркою (сульфіди), азотом (нітриди), фосфором (фосфіди), тощо.

Оксиди, сульфіді і оксисульфіді складають основну частину неметалевих включин у сталі. Залежно від їх форми і розміщення неметалеві включини поділяють на три типи, рис. 2.7.

Методику металографічних досліджень структури і неметалевих включень викладено в ГОСТ1778-85. Для визначення величини зерна або неметалевої включини цим нормативним документом для литих металів рекомендовано використовувати метод Л – лінійне підраховування довжини зерна або неметалевої включини на нетравлених (для визначення НВ) або травлених (для визначення величини зерна) шліфах.

Для досліджень використовують металографічні мікроскопи ММУ-3, МІМ-7, МІМ-8.

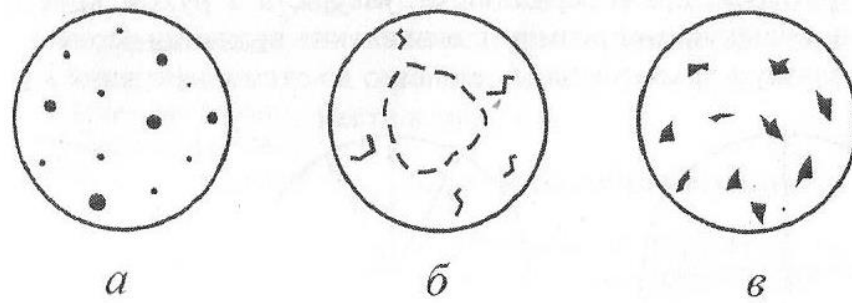


Рис.2.7. Типи неметалевих включин в ливарній сталі

а – I тип (глобулярні, дезорієнтовані); б – II тип (евтектичні, орієнтовані за межами зерен); в – III тип (кутасті, дезорієнтовані)

Під час використання мікроскопа ММУ-3, досліджуваний шліф установлюють на предметний столик і розглядають при збільшенні  $\times 300$ , переміщуючи за допомогою мікрогвинта столик із шліфом в одному напрямку.

При цьому визначають розміри зерен і неметалевих включин, які потрапляють у перехрестя ниток окуляра (рис. 2.8).

Після виходу перехрестя окуляра за поле зору шліфа предметний столик зміщують на 0,5 мм у напрямку, перпендикулярному до переглянутого. Далі підраховування здійснюють, рухаючи шліф у зворотному напрямку. Для достовірної оцінки зміни величини зерна або неметалевих включин необхідно розглянути не менше 150 мм шліфа.

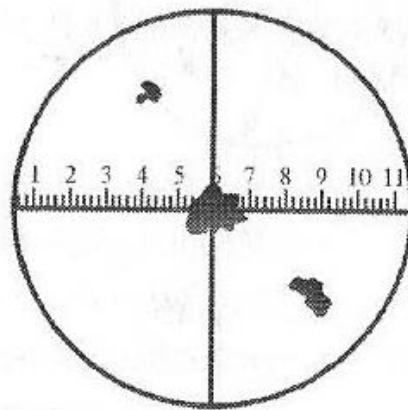


Рис. 2.8. Схема визначення розміру зерна або неметалевої включини, які потрапляють у перехрестя ниток мікроскопа ММУ-3

Під час використання мікроскопів МІМ-7 і МІМ-8 для визначення розмірів зерен або неметалевих включень спочатку визначають ціну поділки барабана окуляра в мікрометрах. Для цього використовують спеціальний об'єкт-мікрометр.

Розмір зерна або неметалевої включини, які потрапляють у перехрестя ниток окуляра, визначають переміщенням перехрестя зліва направо або навпаки на всю довжину зерна або включини, рис. 2.9, підраховують кількість поділок барабана окуляра і множать на ціну поділки.

Оскільки кристалізація здійснюється від периферії стінки виливка до її центру, що призводить до утворення зерна різної величини по перерізу (на периферії завжди буде дрібнозерниста структура, а з рухом кристалізації до центру зерно збільшує свої розміри), визначення величини зерна здійснювати на кожному зразку в трьох місцях відповідно до схеми, наведеної на рис. 2.10.

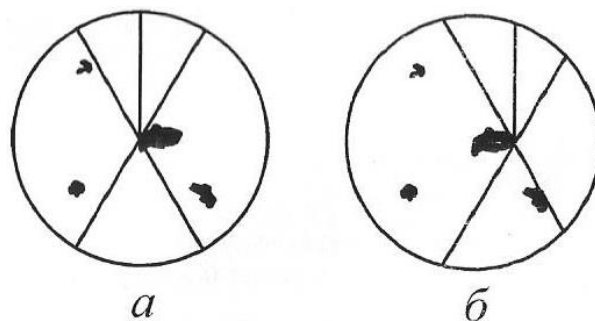


Рис. 2.9. Схема визначення розміру зерна або неметалевої включини, які потрапляють у перехрестя мікроскопа МІМ-7: а – початкове положення перехрестя; б – положення перехрестя після визначення розміру зерна або неметалевої включини

## 2.9 Методики визначення спеціальних властивостей сплавів

Для оцінки жаростійкості сталей за високих температур використовували результати досліджень окалиностійкості в різних агресивних середовищах (рис. 2.11).

Установку для визначення окалиностійкості змонтовано на базі трубчатої силітової печі 1, в алундовій трубці 2 якої розташовували човники із зразками досліджуваних сталей. З метою стабілізування температурного режиму в робочій зоні установка оснащена підігрівачем 3, в якому відбувається підігрівання газової суміші перед її подаванням у реакційну зону.

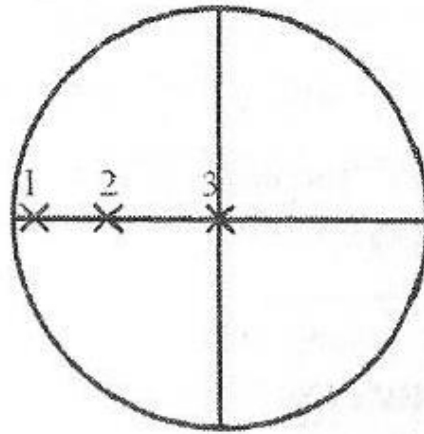


Рис.2.10. Схема визначення розмірів зерна: 1 – на периферії зразка (ливайна кірка); 2 – на середині відстані між периферією і центром зразка; 3 – в центрі зразка

Дозування та вимірювання витрат компонентів газової суміші здійснювали ротаметрами та змішувачами 4 через голчасті крани. Необхідний розрахунковий потік повітря створюється компресором 6 з ресивером 7. Установка забезпечена блоками 5 та 9 для контролю й управління роботою печі, підігрівача та компресора. Швидкість газового потоку в робочій зоні печі складає 0,025 м/с.

За різницею маси зразка до та після випробовування визначали приріст маси  $\Delta P$ , за якою, з урахуванням площі поверхні зразка, розраховували питоме збільшення маси  $q$ , яке є характеристикою окалиностійкості сталей, за формулою:

$$q = \frac{\Delta P}{\tau \cdot S}, \quad (2.10)$$

де  $\Delta P$  – різниця маси зразка до та після випробовування, г;

$\tau$  – час витримування зразка за температури випробовування, год;

$S$  – площа поверхні зразка,  $\text{м}^2$

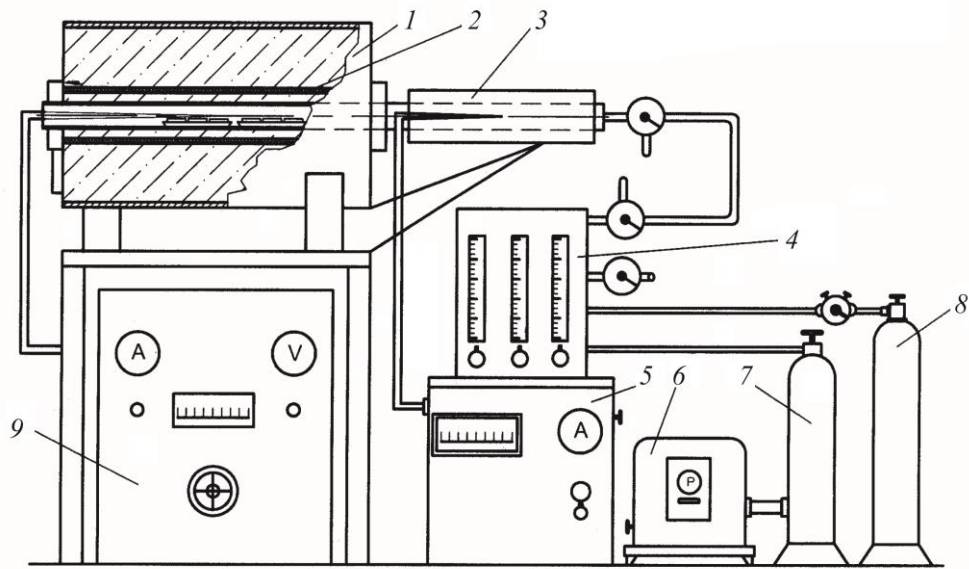


Рис. 2.11. Схема установки для визначення окислостійкості сталей у газових середовищах: 1 – трубчаста силітова піч; 2 – алундова труба; 3 – підігрівач газової суміші; 4 – блок ротаметрів із змішувачами; 5 – блок управління роботою підігрівача та компресора; 6 – компресор; 7 – ресивер; 8 – балон з  $\text{CO}_2$ ; 9 – блок управління роботою печі

## 2.10 Забезпечення точності вимірювань та адекватності математичних моделей

Для виконання вимірювань властивостей сплавів для кожної експериментальної точки використовували не менше 3-х зразків. Математичне оброблення результатів експериментальних даних за обмеженої кількості спостережень здійснювали з використанням розподілу Стюдента за довірчої ймовірності 90% [83].

Побудову графічних залежностей здійснювали з урахуванням довірчих інтервалів середнього арифметичного.

Розмір довірчого інтервалу визначали за формулою:

$$\Delta Y = \frac{t \cdot S}{\sqrt{n}}, \quad (2.11)$$



де  $t$  – коефіцієнт Стюдента за даних  $n$  та  $\alpha$ ;

$S$  – оцінка середньоквадратичного відхилення результату окремого спостереження [84].

Оброблення результатів виконували згідно рекомендацій, викладених в роботі [85]: приділено особливу увагу усуненню грубих і попередженню систематичних помилок у результатах, достатній кількості дослідів, правильній інтерпретації графічного зображення залежностей, перевірці відтворюваності результатів та більш явному відтворенню залежностей у вигляді  $y = f(x)$ .

Усі виконані рівняння регресії та їх коефіцієнти були перевірені на адекватність. За критерієм Кохрена та його порівнянням із табличним значенням визначали відтворюваність експериментів [83...86]:

$$G_p = \frac{(S_u^2)_{\max}}{\sum S_u^2}, \quad (2.12)$$

де  $G_p$  – розрахункове значення критерію Кохрена;

$S_u^2$  – дисперсія;

$u$  – число дослідів у плані експерименту

Статистичну значущість коефіцієнтів регресії визначали, виходячи із розрахунку їх дисперсій і значень критеріїв Стюдента щодо кожного коефіцієнта [85]:

$$t_{pi} \geq t_T; \quad (2.13)$$

де  $t_T$  – табличне значення критерію Стюдента;

$i = 0, 1 \dots k$

$$t_{pi} = \frac{|b_i|}{S_{\bar{y}} / \sqrt{N}}, \quad (2.14)$$

де  $b_i$  – коефіцієнт регресії;

$S_{\bar{y}}$  – загальна помилка експерименту;

$N$  – кількість дослідів у плані експерименту

Після виведення в остаточному вигляді рівняння регресії та встановлення значущих коефіцієнтів перевіряли гіпотезу щодо адекватності моделі, тобто здатності рівняння регресії передбачати відгук із задовільною точністю. Перевірку здійснювали за допомогою критерію Фішера [83...86]:

$$F_{f_1, f_2}^{\text{розрах}} = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} \leq F_{f_1, f_2}^{\text{табл}} \quad (2.15)$$

При цьому дисперсію дослідів розраховували за формулою:

$$S_y^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^u (y_{ui} - \bar{y}_u)^2, \quad (2.16)$$

де  $m$  – кількість повторювань дослідів за однакових умов;

$u$  – кількість дослідів у плані експерименту.

Дисперсія адекватності розрахована за формулою [83, 85]:

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{u=1}^{N_k} (y_u^{\text{розрах}} - y_u^{\text{експ}})^2 - \sum_{u=1}^{n_0} (y_{ou} - \bar{y}_0)^2}{f_2}, \quad (2.17)$$

де  $f_2$  – число ступенів свободи, яке визначається за формулою:

$$f_2 = N - k' - (n_0 - 1), \quad (2.18)$$

де  $k'$  – число статистично значущих коефіцієнтів у рівнянні регресії;

$N$  – кількість дослідів у плані експерименту;

$n_0$  – кількість дослідів у центрі плану (на основному рівні).

## 2.11 Висновки до розділу

1. Для подальших досліджень обрано феросплави з низькою температурою плавлення, що пов'язано з високим вмістом вуглецю, промислові порошки та їх механічні суміші для приготування ливарного покриття.

2. Відпрацьовано технологію приготування та нанесення на поверхню стрижня легувального покриття.

3. Розроблено технологію виготовлення форм та стрижнів для нанесення легувального покриття.

4. Розроблено технології одержання біметалевих виливків з використанням поверхневого легування, що засвідчує акт впровадження (додаток А).

## РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИЛИВКІВ ІЗ  
ЗНОСОСТІЙКИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ ПОВЕРХНІ**3.1 Дослідження процесів поверхневого легування при використанні окремих феросплавів**

Дослідження процесів зносостійкого поверхневого легування здійснено при використанні окремих феросплавів, до складу яких входять карбідоутворювальні елементи (табл. 2.1).

**Марганець.** Відомо, що додавання марганцю призводить до суттєвого підвищення зносостійкості залізовуглецевих сплавів, а тому в досліді вивчали його поведінку в складі легувального покриття.

Практичний та теоретичний інтерес представляють дослідження кривих охолоджень недорогих феросплавів з метою визначити можливість їх використання для виготовлення виливків з диференційними властивостями поверхні. Для експерименту вибрано стрижень, на який нанесли покриття товщиною 5 мм. Термопари ВР 5/20 з кварцовими наконечниками встановлювали в точках, зазначених на рис. 2.5. Результати досліджень показано на рис. 3.1.

Аналізом кривих охолоджень встановлено, що використання даних феросплавів доцільно для поверхневого легування. Для всіх компонентів очевидне їх розплавлення під дією температури розплаву, оскільки їх температури плавлення значно нижче за температуру плавлення заліза. Розплавлення легуючих покриттів підтверджено візуальним аналізом отриманих зразків. У відповідності до вмісту вуглецю температура плавлення феромарганцю 1200 °С для ФМн78А та 1240 °С – Мн965.

Рис. 3.2 показує залежність зміни товщини легованого шару від товщини легувального покриття при застосуванні різних марок марганцю.

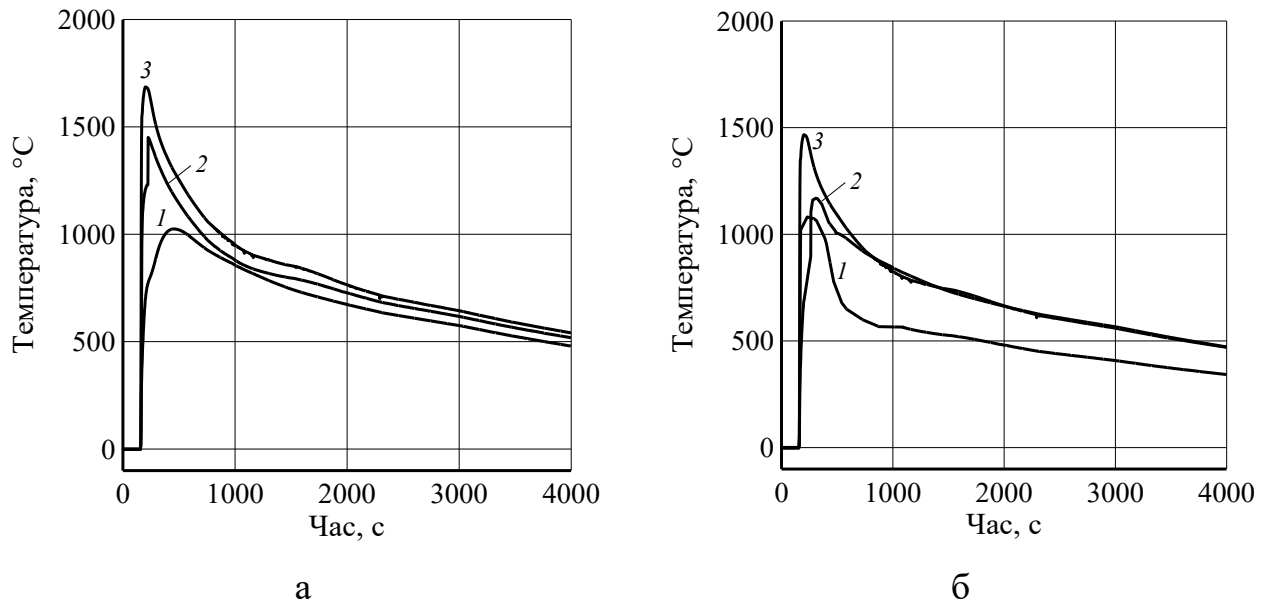


Рис. 3.1. Криві охолодження: а – ФМн78А; б – Мн965: 1 – нижня межа покриття - стрижень; 2 – середина покриття; 3 – верхня межа покриття - рідкий метал

В цих дослідях використовували порівняно дрібнодисперсний (фракція  $<0,2$ ) високовуглецевий ФМн78А, металевий Мн965 та низьковуглецевий ФМн1,5 феромарганець приблизно з однаковим вмістом марганцю (див. табл. 2.1).

Виявлено, що застосування високовуглецевого феромарганцю ФМн78А наповнювачем легувального покриття дає найвищий відсоток товщини легованого шару. Якщо показник товщини нанесення легувального покриття складає 7 мм, товщина легованого шару буде досягати 12 мм. Отже, ймовірно, низька температура плавлення використаного покриття зумовлює майже повне його використання, тобто, розплавлення та змішування із металом основи.

Така ж закономірність зміни товщини легувального шару в залежності від товщини легувального покриття спостерігається і для інших компонентів. Але рівень легованого шару незначно зменшується, хоч і залишається доволі високим (10,6 мм для Мн965 и 9,5 мм – для ФМн1,5 при товщині покриття 7 мм). Зміна товщини легованого шару пояснюється підвищенням температури плавлення ФМн1,5, а застосування марганцю Мн965 сприяє утворенню легова-

ного шару з великою концентрацією марганцю і збільшенню перехідної зони внаслідок швидкого плавлення марганцю.

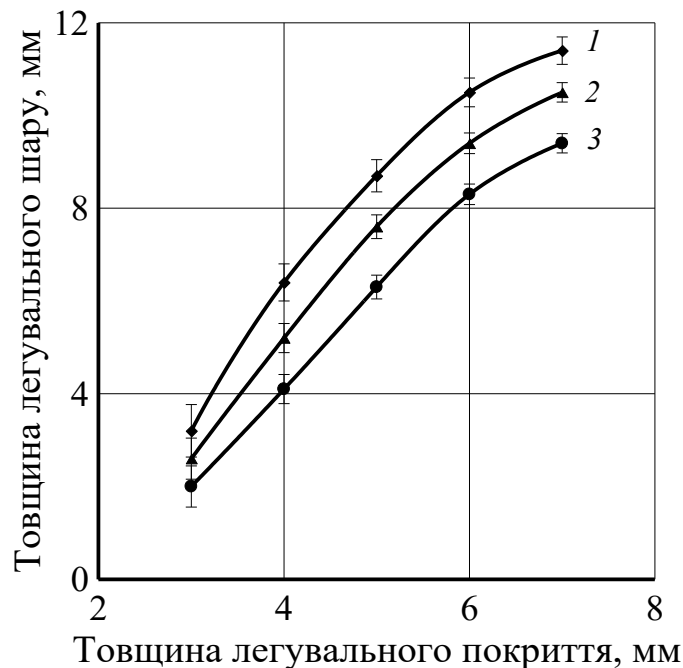


Рис. 3.2. Зміна товщини легованого шару в залежності від товщини легуючого покриття (фракція < 02): 1 – ФМн78А; 2 – Мн965; 3 – ФМн1,5

Отже, можна зробити висновок, а разом із тим і дати рекомендацію: для поверхневого легування із високим показником зносостійкості економічно обґрунтованіше застосовувати недорогий високовуглецевий феромарганець, що забезпечує стабільність процесу поверхневого легування та приводить до утворення надійного легованого шару зі значною товщиною.

Дослідження впливу окремих феросплавів різних фракцій на товщину легованого шару складає теоретичний та практичний інтерес.

В усіх дослідках, що проводилися, було використане легуюче покриття з товщиною 3 мм, що зумовлено виробничими можливостями. На рис. 3.3 представлено результати цих досліджень.

Отже, на рис. 3.3 спостерігається зменшення товщини легованого шару для всіх компонентів, яке зумовлено збільшенням гранулометричного складу легуючого покриття, проте кращий результат одержується при застосуванні високовуглецевого феромарганцю ФМн78А. Менш задовільний результат одержується із застосуванням чистого марганцю Мн965, а найменший показник

товщини легованого шару спостерігається із застосуванням низьковуглецевого феромарганцю ФМн1,5. Очевидне розплавлення кожного компоненту під впливом температури розплаву, але тепловмісту рідкого металу замало для остаточного розплавлення легувального покриття на основі крупніших фракцій. Про це свідчить і візуальний аналіз одержаних зразків після видалення їх із форми: із збільшенням фракції кількість легувального покриття, яке не розплавилось, зростає. Очевидно, для повного розплавлення покриття необхідно підвищувати температуру розплаву, збільшувати швидкість заповнення ливарної форми металом для збереження його тепловмісту або використовувати інші технологічні заходи [98...101].

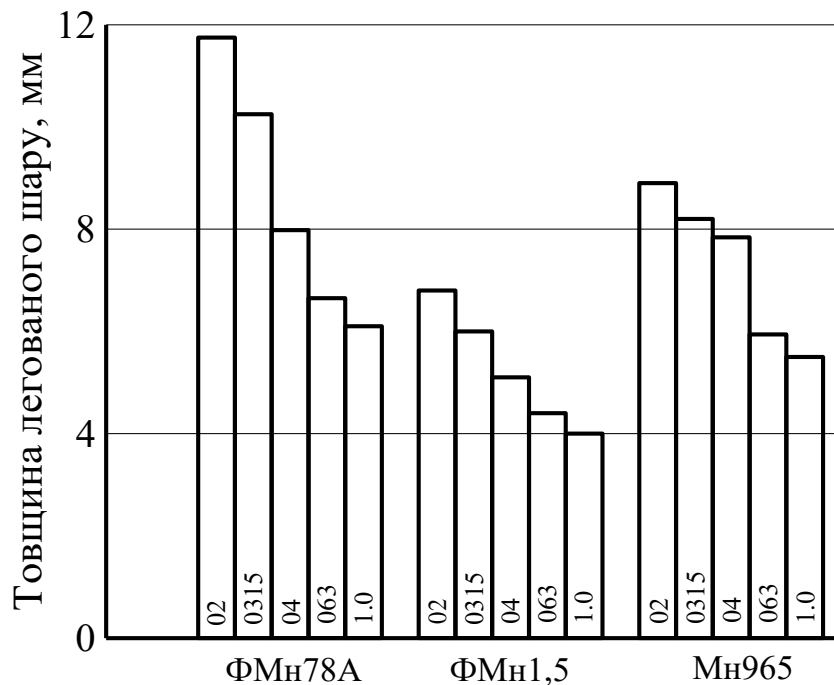
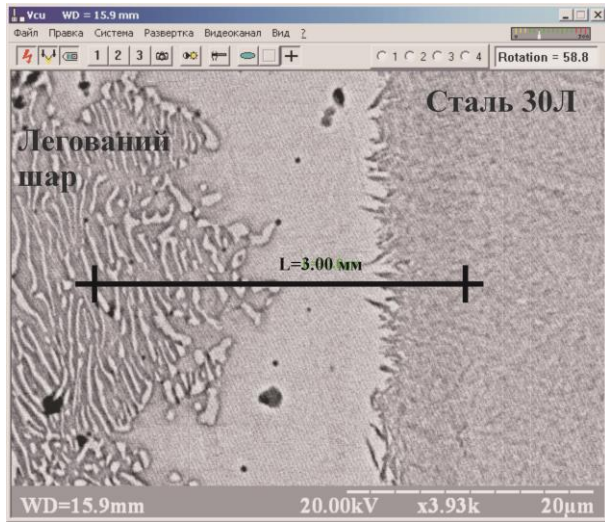
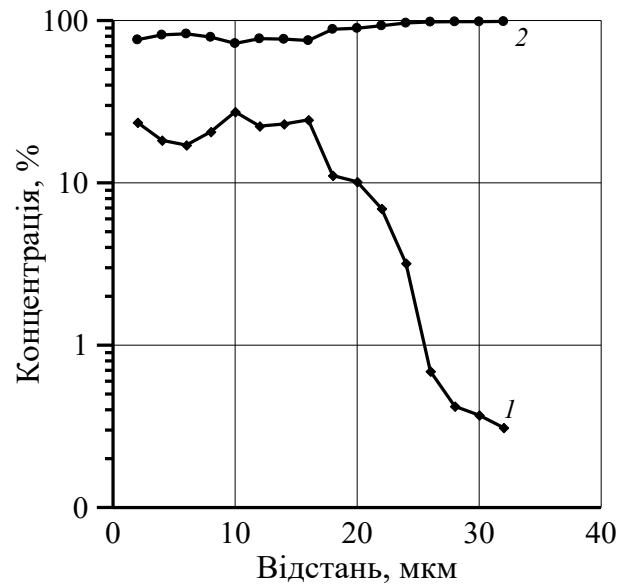


Рис.3.3. Зміна товщини легованого шару в залежності від фракції наповнювача легованого покриття

Кращими є результати, отримані із застосуванням високовуглецевого феромарганцю ФМн78А. Практичний інтерес представляє саме зміна легованого шару по його товщині. Подрібнення феросплавів ручним способом у ступці дає утворення найбільшої кількості порошку із розмірами 02; 0315 і 04. Використання цих фракцій, як наповнювачів легувального покриття, призводить до утворення легованого шару необхідної для експлуатації виробів товщини рис. 3.4.



а



б

Рис. 3.4. Структура легованого шару з використанням ФМн78А (а) розподілення марганцю в структурі (б); 1 – Mn; 2 – Fe

При всіх дослідях товщина легувального покриття дорівнювала 3 мм.

Результати досліджень наведено на рис. 3.5.

Виявлено, що найбільшої твердості легованому шару, яка досягає 68 HRA надає використання феромарганцю фракції 0315, що майже вдвічі більше твердості основи.

Використання фракцій 02 і 04 дає дещо менші значення твердості.

Такий вплив марганцю на зміну твердості, в залежності від його фракції можна, очевидно, пояснити наступним: при застосуванні фракції 0315 одночасно здійснюються процеси розплавлення легувального покриття та просочування рідкого металу в капіляри легувального покриття з подальшим утворенням і карбідів марганцю, і твердого розчину, що для легованого шару сприяє суттєвому підвищенню твердості.

При застосуванні фракції 02 здійснюється розплавлення легувального покриття, починаючи з його поверхні (просочування покриття рідким металом мінімальне), а тому структуроутворення змінюється у бік збільшення твердого розчину.

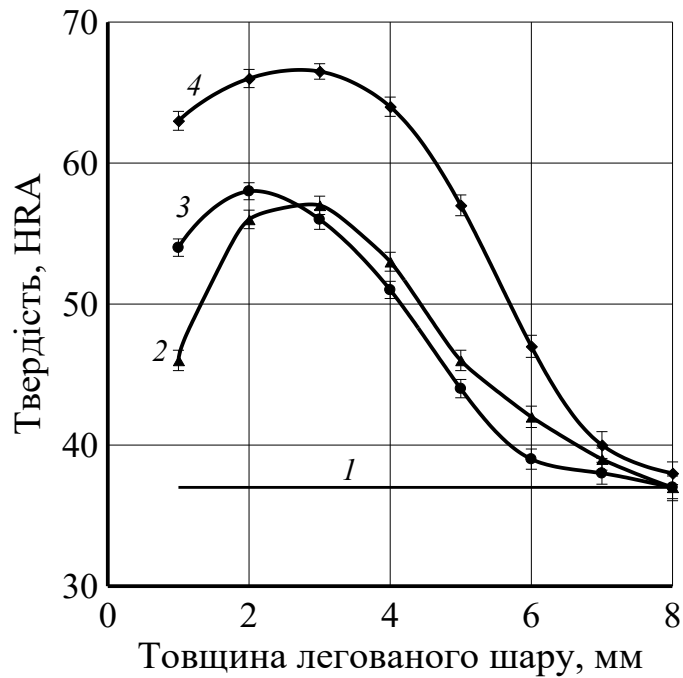


Рис. 3.5. Зміна твердості легуваного шару по його товщині в залежності від використаної фракції ФМн78А: 1 – твердість основи; 2 – фракція 04 ; 3 – фракція 02; 4 – фракція 0315

При використанні фракції 04 на перше місце виходять процеси просочування легувального покриття рідким металом і твердість легуваного шару посідає проміжне значення (див. рис. 3.5).

Визначити товщину легуваного шару разом з його перехідною зоною з певною достовірністю можна за зміною твердості.

Отже для отримання легуваного шару з максимальною твердістю та найбільшою товщиною при застосуванні високовуглецевого феромарганцю ФМн78А як наповнювача легувального покриття потрібно використовувати фракцію 0315 [98...101].

**Титан.** Відомо, що титан – один з елементів, які утворюють одночасно твердий розчин, нітриди, оксиди, карбіди та інші сполуки.

При дослідженні температур плавлення зразків з легувальним покриттям на основі титану використовувались феротитан ФТи30А та ФТи70А, результати представлено на рис.3.6.



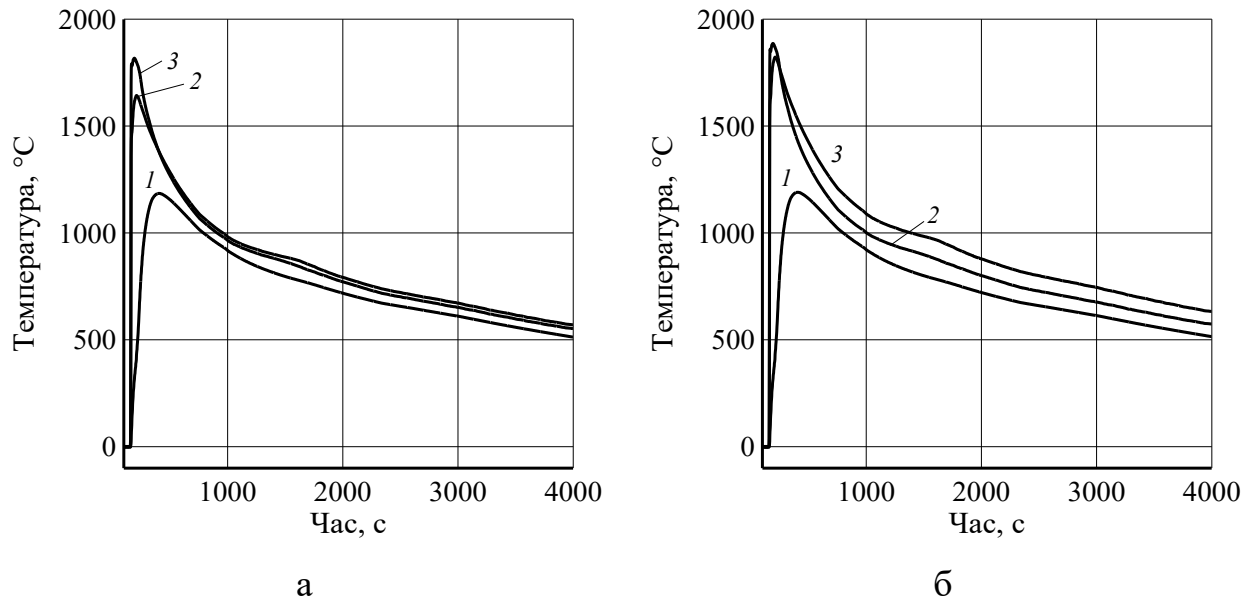


Рис. 3.6. Криві охолодження покриття при застосуванні: а – ФТi30А; б – ФТi70А: 1 – нижня межа знизу покриття – стрижень; 2 – середина покриття; 3 – верхня межа покриття – рідкий метал

Отримані результати показують, що температури металу основи, що заливається, достатньо для розплавлення легувального покриття на основі даних феросплавів.

Як наповнювача легувального покриття вивчено доцільність використання феротитану різних фракцій. Результати досліджень показано на рис. 3.7.

Установлено, що максимальне значення товщини легованого шару досягається підчас використання в обох випадках фракції 0315. Такий вплив різних фракцій феротитану на товщину легованого шару і його властивостей має таке пояснення як і для впливу феромарганцю: при застосуванні фракції 0315 одночасно здійснюються процеси розплавлення часточок легуючого покриття й проникнення розплаву в капіляри легуючого покриття, що й спричинює утворення легованого шару товщиною понад 6 мм (див. рис.3.7).

Оскільки найкращі результати було отримано підчас використання феротитану ФТi30А, доцільним є дослідження твердості легованого шару по його товщині. Результати досліджень показано на рис. 3.8.

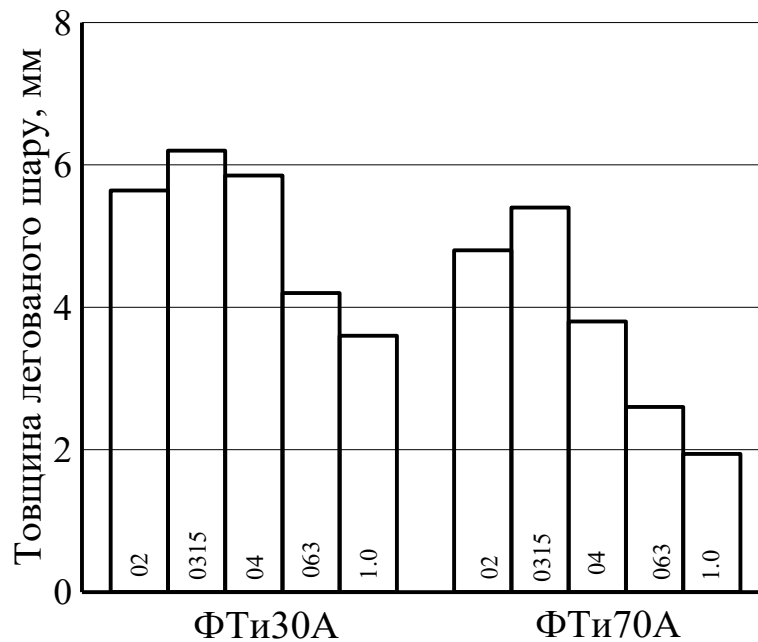


Рис. 3.7. Зміна товщини легованого шару залежно від фракції наповнювача покриття із різних компонентів

Встановлено, що найвищі показники твердості дає шар, утворений під час застосування феротитану марки ФТi30А фракції 0,315. Показники твердості легованого шару досягають 59 HRA, це в 1,5 рази більше у порівнянні з твердістю основного металу.

Підчас використання фракції 02 твердість нижча ніж основи, очевидно це спричинено утворенням легованого фериту на поверхні легованого шару. З ростом товщини легованого шару збільшується кількість карбонітридів титану, також підвищується його твердість. Із застосуванням феротитану фракції 0315 спостерігається схожа залежність [98...101].

Отже для отримання максимальної твердості легованого шару, легуюче покриття повинно бути виготовлене з використанням фракції 0315.

Дослідженням структур встановлено, що в усіх випадках утворюється перехідний шар, який забезпечує міцний зв'язок основи з зносостійким легованим шаром (рис.3.9).

Встановлено, що для всіх наповнювачів найкращі результати дають покриття фракцій 0315 та 04, оскільки здійснюється проникнення розплаву в легуюче покриття з подальшим розплавленням компонентів покриття. В той же час

непогані результати дають покриття на основі фракцій 02, особливо в випадках, коли превалює розплавлення компонентів легувального покриття під дією тепла рідкого металу (ФМн 78А, Мн965).

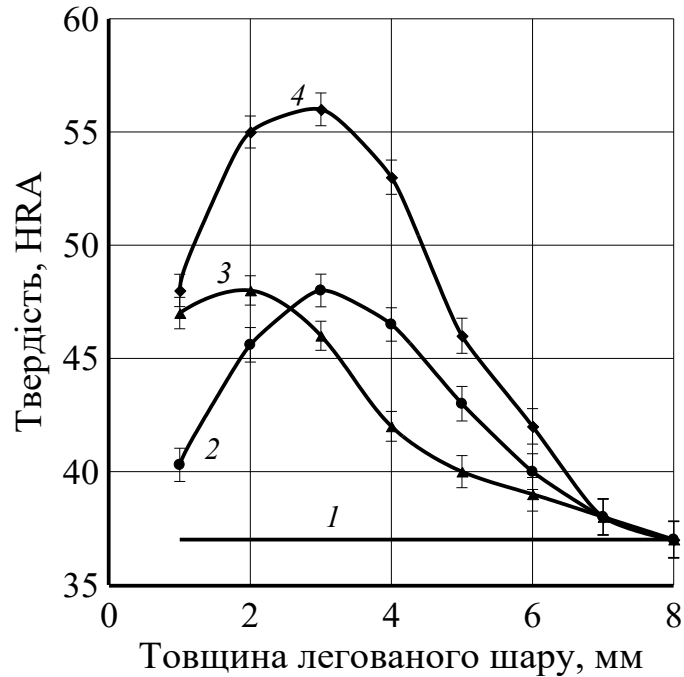
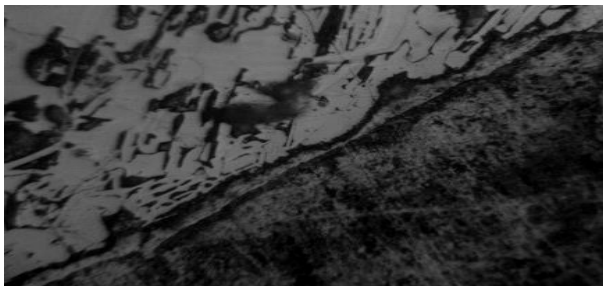


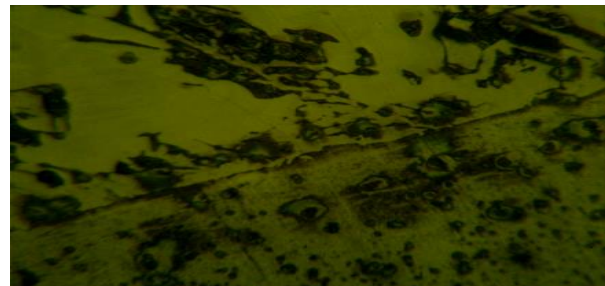
Рис. 3.8. Зміна твердості легуваного шару по його товщині в залежності від фракції ФТн30А: 1 – твердість основи; 2 – фракція 02; 3 – фракція 04; 4 – фракція 0315.

Товщина легуваного шару головним чином залежить від глибини просочування рідкого металу в пори легувального покриття при початковому контакті з металом основи.



× 1000

*а*



× 1000

*б*

Рис. 3.9. Вплив ФМн78А (а) та ФТн35А (б) на утворення перехідного шару в структурі металу

Оскільки легуюче покриття представляє собою достатньо масивний холодильник (особливо товщиною 5...7 мм), то глибина проникнення розплаву в пори покриття, в значній мірі буде залежати від температури і рідко-текучості металу основи. Тому при виборі складу покриттів і їх фракцій необхідно, насамперед керуватися такими факторами як температура заливки металу та ливарної форми [98...102].

### **3.2 Дослідження процесів поверхневого легування з використанням механічних сумішей феросплавів**

В роботі вивчена можливість використання механічних сумішей основних карбідоутворювальних елементів для поверхневого легування з метою одержання максимальної твердості робочих поверхонь литих виробів.

Вміст компонентів у сумішах та її розрахунковий хімічний склад наведено в табл. 2.2 (суміші 1...4), а результати впливу легувальних покриттів на їх основі на товщину легованого шару – на рис. 3.10. В усіх дослідях використовували покриття 3 мм, виходячи із виробничих можливостей – нанесення покриттів пульверизатором.

Як видно із табл. 2.2, механічні суміші мають різницю у вмісті заліза, марганцю та вуглецю. Звичайно, через таке співвідношення компонентів, які є у сумішах, відрізнятися вони також будуть температурою плавлення: найвища – покриття №1, найнижча – покриття №4. Саме цим і пояснюються найкращі результати, одержані при застосуванні покриття №4 (фракції < 02 та 02).

Отже, виходячи з даних результатів видно, що будь-яка із сумішей, які було використано для дослідів, підходить для отримання легованого шару з високою зносостійкістю. Застосування кожної з них визначається необхідною товщиною зносостійкого шару в деталі та наявністю відповідної фракції феросплаву [101].

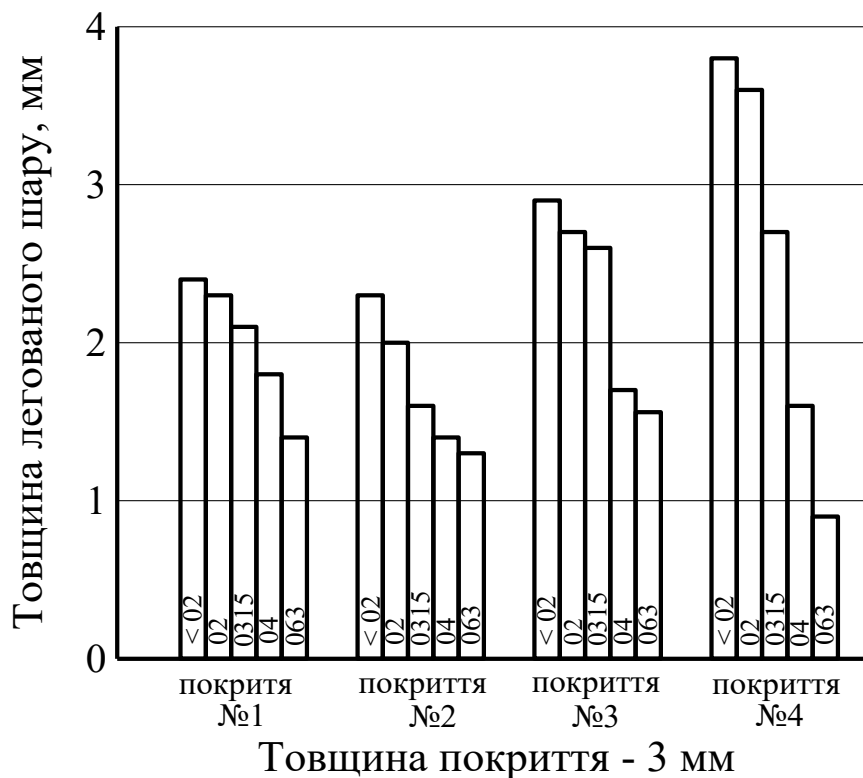


Рис.3.10. Вплив легуючих покриттів на основі механічних сумішей та їх гранулометричного складу на товщину легового шару.

Як видно із рис. 3.10, найкращі результати дають усі суміші (особливо №4) при використанні дрібнодисперсних порошків (< 02; 02). Очевидно, в цих випадках превалює розплавлення та розчинення компонентів легувального покриття під дією тепла розплавленого металу. Покриття, отримані із застосуванням фракцій 0315 та 04, також показують непогані результати. В цих випадках, очевидно, здійснювались спочатку просочування легувального покриття розплавом з подальшим розплавленням і розчиненням компонентів покриття. Товщина легового шару найчастіше буде залежати від першочергового просочування рідкого металу в пори покриття. Оскільки легувальне покриття являє собою досить потужний холодильник (особливо товщиною 5...7 мм), то глибина проникнення розплаву у пори покриття у значній мірі буде залежати від температури і рідкотекучості металу основи. Тому при вибиранні складу сумішей та їх фракцій необхідно, перш за все, керуватися цими факторами.

Найкращі результати одержано при використанні покриття №4. Інтерес представляють дослідження впливу товщини легувального покриття різного гранулометричного складу на товщину легованого шару. Результати досліджень наведено на рис 3.11.

Як видно із рис. 3.11, залежності підвищення товщини легованого шару від збільшення товщини легуючого покриття прослідковуються такі ж як і при застосуванні окремих феросплавів (див. рис. 3.2). Але через підвищення температур плавлення механічної суміші у порівнянні, наприклад, з феромарганцем ФМн78А, показник товщини легованого шару практично вдвічі нижчий, ніж при використанні ФМн78А. Аналіз результатів дає висновок: товщину легувального покриття і його гранулометричний склад вибирають в залежності від необхідної товщини зносостійкого шару на реальних деталях, можливості перегрівання металу основи і підігрівання форм і стрижнів перед їх заливанням.

Очевидно, що практичний інтерес представляють дослідження властивостей легованого шару в зв'язку з тим, що механізми утворення легованого шару дещо відрізняються в залежності від товщини легувального покриття та його гранулометричного складу [101].

Вивчено вплив товщини легувального покриття на твердість легованого шару з використанням фракції 0315. Така фракція вибрана з тих міркувань, що при її використанні здійснюються одночасно процеси розплавлення і розчинення компонентів покриття після просочування його рідким металом, а також дифузійні процеси, які сприяють рівномірному розосередженню легувальних елементів в об'ємі легувального шару та перехідної зони.

Результати досліджень наведено на рис. 3.12

Як видно із рис. 3.12, максимальна твердість досягається при товщині покриття 4 мм для суміші №4, а для сумішей №1, №2 і №3 – при товщині покриття 5 мм. Твердість легованого шару при цьому в 2,3...2,5 разів вища твердості основи вилівка, яка знаходиться на рівні 30...32 HRA.

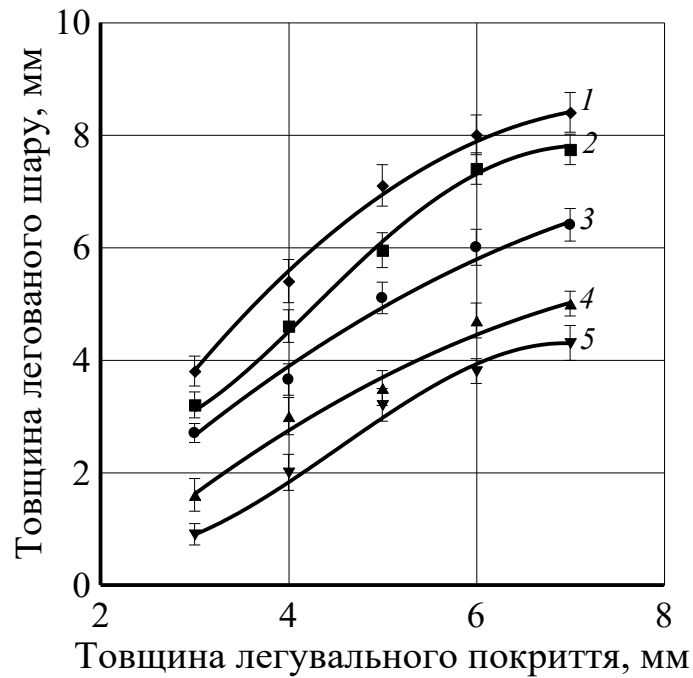


Рис. 3.11. Зміна товщини легованого шару в залежності від товщини ле-  
гуючого покриття (покриття 4): 1 – фракція < 02; 2 – фракція 02; 3 – фракція  
0315; 4 – фракція 04; 5 – фракція 063

Таку закономірність можна пояснити утворенням максимальної кількості карбідів і твердих розчинів, тобто, деяким легуванням металу основи марганцем, хромом і титаном при товщинах легувального покриття до 5 мм.

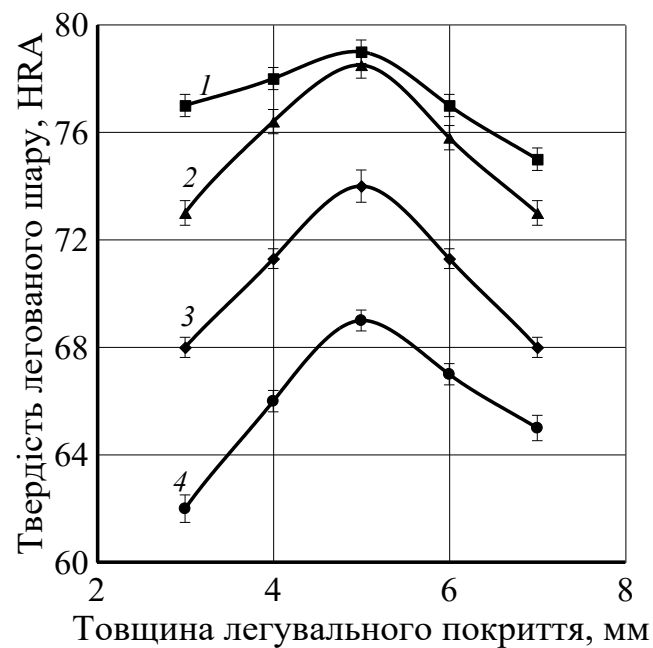


Рис. 3.12. Вплив товщини легованого покриття на твердість легованого  
шару: 1 – покриття 4; 2 – покриття 3; 3 – покриття 2; 4 – покриття 1

Проте при збільшенні товщини легувального покриття починає пере-  
валювати ефект легування, кількість карбідної фази зменшується, твердість ле-  
гованого шару дещо знижується, але вона залишається досить високою внаслі-  
док зміцнення металу основи як карбідами, так і утворенням твердих розчинів  
та дисперсійним твердненням внаслідок присутності титану.

Для досягнення максимальної твердості поверхні, а разом із нею і зносо-  
стійкості виробу або його окремих частин, доцільно використовувати перш за  
все із вивчених легувальне покриття № 4 товщиною до 4 мм, яку можна одер-  
жати в умовах виробництва нанесенням на поверхні форм і стрижнів за допо-  
могою пульверизатора.

Дослідження зносостійкості легованого шару представлено на рис.3.13.

Аналізом результатів зносостійкого поверхневого легування встановлено,  
що його зносостійкість та твердість майже в 1,5 рази вища твердості основи, що  
пов'язано з утворенням додаткових карбідів.

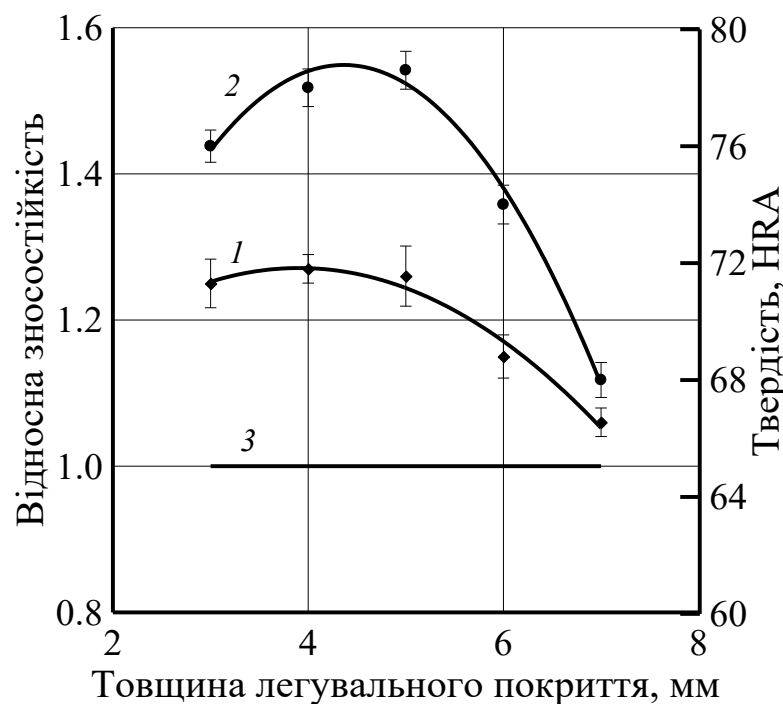


Рис. 3.13. Дослідження зносостійкості:

1 – відносна зносостійкість; 2 – твердість; 3 – сталь 30Л



Отже, для отримання якісного легованого шару необхідної товщини і твердості доцільно використовувати в якості легуючих покриттів механічні суміші з розмірами частинок 02 і 0315. Покриття з розмірами частинок 04 і 063 доцільно використовувати при виробництві литих заготовок з товщиною стінок понад 30 мм, при цьому слід здійснювати максимально можливе для конкретних виробничих умов перегрівання металу перед заливкою його в форми.

Науковий інтерес представляє розподіл і залишковий вміст марганцю в структурі легованого шару. Для дослідження було взято суміш №3 і №4. результати показані на рис. 3.14.

Встановлено, що для досягнення необхідної твердості і кількості карбідів, які сприятимуть достатній зносостійкості в механічній суміші необхідно, щоб ФМн78А було 20 ... 25%.

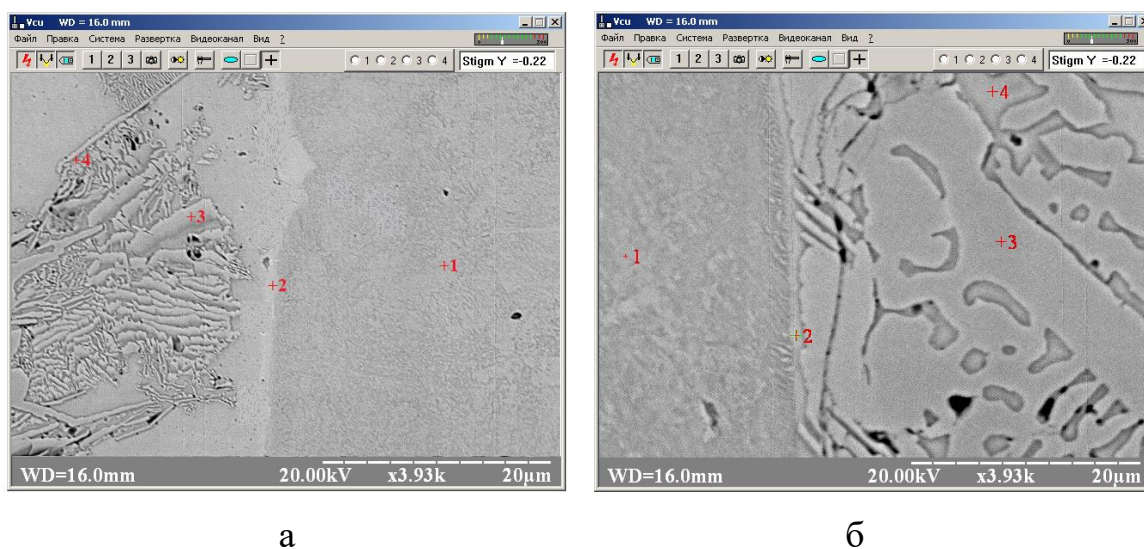


Рис. 3.14. Структура сталей з використанням механічної суміші №3 (а); з використанням механічної суміші №4 (б)

Такий розподіл елементів дозволяє при незначних витратах і простій технології отримувати виливки з робочим шаром на рівні сталі 110Г13Л. Зі збільшенням вмісту марганцю в сталі підвищуються її твердість, опір розриву, стійкість проти стирання (11...13% Mn) і антикорозійні властивості.

Хімічний склад в точках (див. рис. 3.13) показано в табл. 3.1.

## Хімічний склад точок

Точка №	Si	Cr	Mn	Fe	Точка №	Si	Cr	Mn	Fe
рис. 3.12, а					рис. 3.12, б				
1	0,31	0,07	0,12	99,41	1	1,01	0,15	1,03	97,74
2	0,18	0,22	8,80	90,90	2	0,49	0,22	12,32	86,94
3	0,06	0,03	22,25	77,67	3	0,09	1,32	37,73	60,85
4	0,07	0,03	15,88	84,02	4	0,66	0,30	23,68	75,36

Рентгеноструктурним дослідженням встановлено, що вміст фази карбідів та Fe в структурі ставить 33...39 % та 61...67 % відповідно, рис. 3.15.

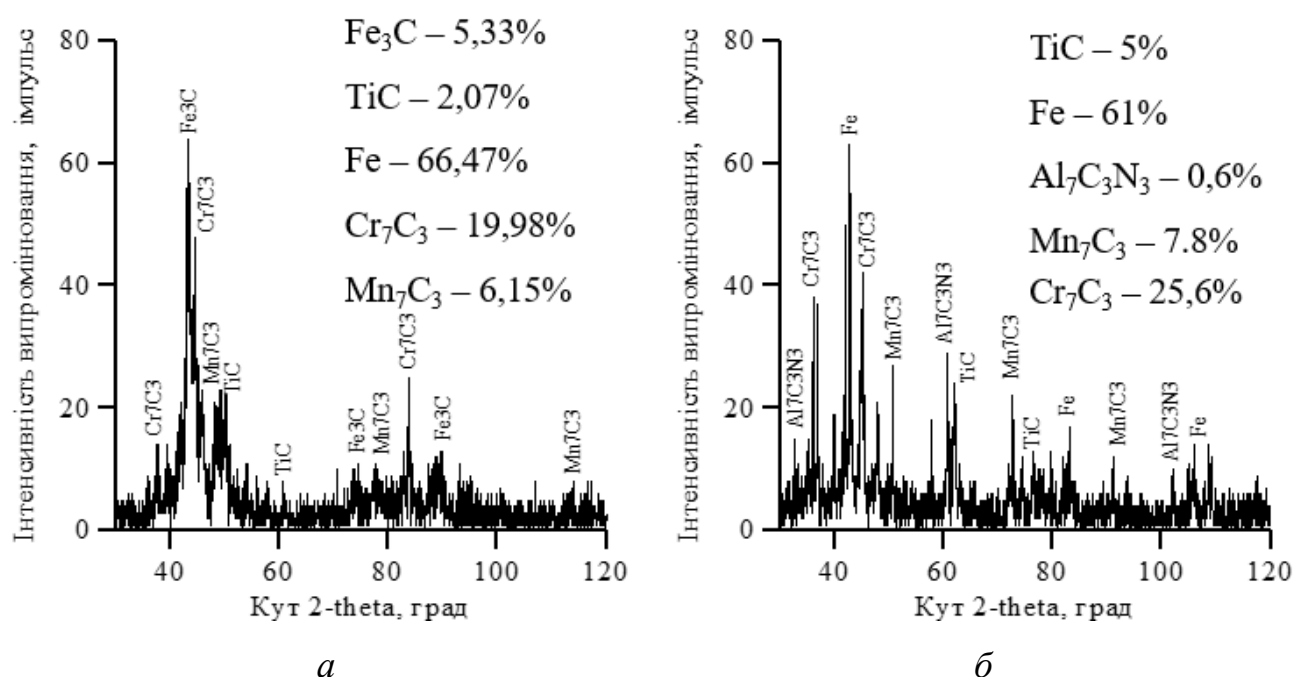


Рис. 3.15. Дифрактограма легованого шару з використанням суміші №3 (а) та №4 (б)

Така кількість карбідної фази в повній мірі задовольняє правилу Шарпі. Збільшення кількості феромарганцю в складі механічної суміші призводить до підвищення кількості карбідної фази до 40...50 %, що призводить до підвищення твердості легованого шару, але при цьому призводить до викришування карбідом марганцю і погіршення зносостійкості.

### 3.3 Дослідження процесів поверхневого легування з використанням сполук легувальних елементів

Промисловістю України випускаються різні хімічні сполуки: карбіди, бори́ди, нітриди та інші, які представляють інтерес для технологій поверхневого легування.

Нами вивчено вплив деяких із них на твердість і товщину зносостійкого шару: карбіду ванадію різних фракцій, боридів титану, карбідів хрому та суміші: 50%  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ +50% VC.

Результати досліджень наведено на рис. 3.16.

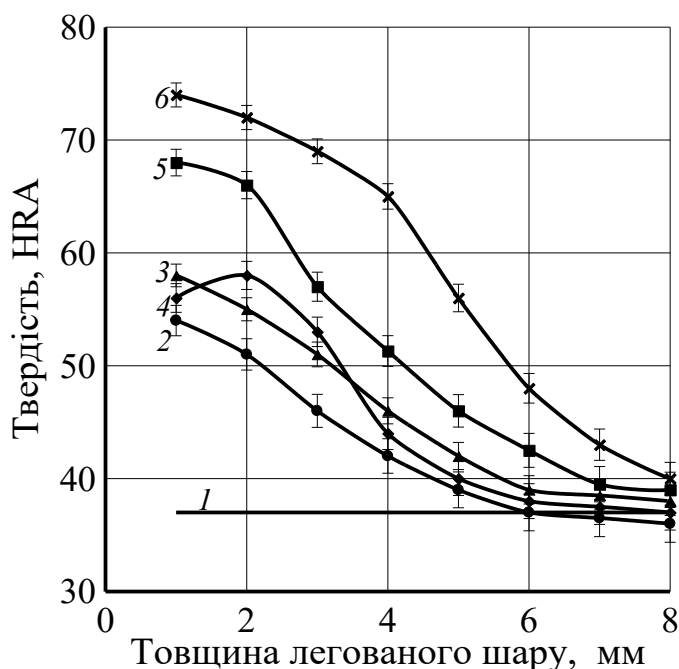


Рис. 3.16. Вплив сполук легувальних елементів на твердість зносостійкого шару: 1 – твердість основи; 2 –  $\text{TiB}_2$ ; 3 – VC (фракція 02); 4 –  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ; 5 – VC (фракція 01); 6 – 50%  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  + 50% VC(фракція 02)

Установлено, що всі сполуки сприяють підвищенню твердості поверхні виливка, але найкращі результати одержано після використання суміші карбідів хрому і ванадію. Твердість на поверхні легуваного шару досягає 73 HRA, що вдвічі більше, ніж твердість основи.

Зрозуміло, що рекомендувати як наповнювач легувального покриття такі сполуки в зв'язку з високою їх вартістю мабуть недоцільно. Проте одержані ре-

зультати показують можливість їх використання в кількості до 2 % при виробництві зносостійких литих деталей, які не піддаються механічному обробленню.

### 3.4 Дослідження технологічних процесів поверхневого легування

Дослідження впливу гранулометричного складу компонентів легувального покриття на товщину і мікротвердість легованого шару. В якості компонентів покриття використано механічну суміш порошків феросплавів та карбіду титану в певному співвідношенні на основі проведених раніше дослідів (ФМн78А – 70%, ФТи30А – 20%, ФБ – 5%, ТiС – 5%). В якості зв'язуючих компонентів використовували рідке скло ( $M = 2,5$ , щільність  $1400 \text{ кг/м}^3$ ) і технічний лігносульфонат. Товщина легованого шару в усіх дослідах складала 5 мм. Температуру розплаву перед заливкою форм витримували на рівні  $1630 \pm 10^\circ \text{C}$ . Товщина литих зразків складала 30 мм. В якості розплаву використовували середньовуглецеву сталь 30 Л.

Найкращі результати одержано при використанні компонентів фракції 02 и 0315 (рис.3.17). Не дивлячись на те, що покриття представляє собою холодильник, воно швидко нагрівається до температури рідкого металу. В першому випадку процес поверхневого легування здійснюється найбільш інтенсивно внаслідок розплавлення покриття під дією тепла залитого металу, оскільки компоненти покриття (за виключенням карбіду титану) мають меншу температуру плавлення, чим залитий метал. Компоненти покриття фракції 02 внаслідок незначних мікрооб'ємів швидко розчиняються і утворюють найбільшу товщину легованого шару. Карбід титану в такому покритті грає роль зміцнюючого компоненту легованого шару.

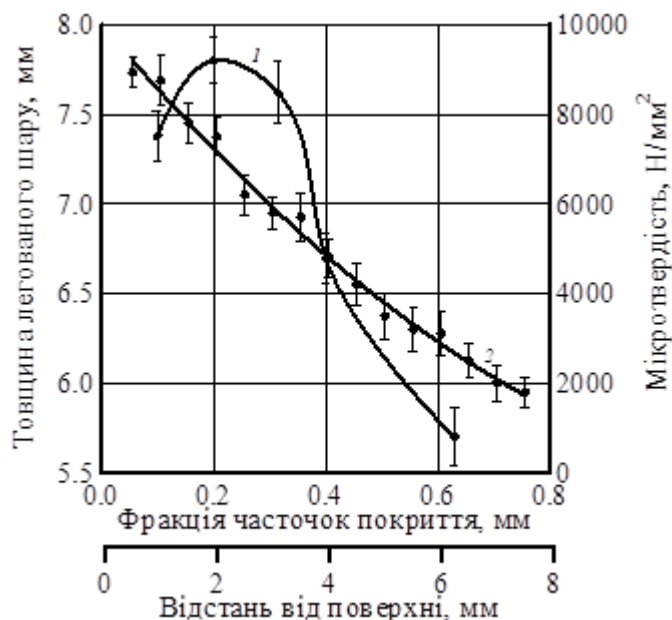


Рис. 3.17. Зміна товщини (1) легованого шару в залежності від гранулометричного складу компонентів легуючого покриття і його мікротвердості (2) по товщині після використання компонентів фракції 02

В другому випадку частинки компонентів легованого покриття фракції 0315 мають більші розміри тому процес утворення легованого шару здійснюється дещо по іншому. Рідкий метал під час заливання в форму під тиском проникає в пори покриття та нагріває його до температури плавлення. Тепла металу достатньо для розплавлення поверхневого шару покриття, в подальшому починають переважати дифузійні процеси, які протікають значно повільніше. Товщина легованого шару дещо зменшується, але залишається досить значною.

Під час протікання процесів поверхневого легування істотно змінюється структура металу основи, оскільки в поверхневому шарі утворюються твердий розчин заліза з легуючими елементами, що входять до складу компонентів покриття, карбіди марганцю, карбонітриди титану, борид, що істотно підвищує мікротвердість структурних складових і загальну твердість робочого шару металу [101].

При використанні фракцій 04 і 063 процеси легування здійснюються за схемою, описаною для фракції 0315. Однак в цих випадках тепловміст рідкого металу, при інших рівних умовах, недостатньо для повного розплавлення і роз-

чинення компонентів. Товщина легованого шару істотно зменшується, а якість поверхні погіршується внаслідок появи шорсткості внаслідок не розплавлених повністю частинок компонентів покриття.

Загалом, процес утворення легованого шару при використанні крупнозернистих або тугоплавких компонентів легуючих покриттів можна уявити в такому вигляді. В результаті значного перегрівання розплаву, що заливається в форму, на початку процесу кірка затверділого металу на поверхні виливки не утворюється, тепла основного металу досить, щоб розігріти легуюче покриття до температури, яка сприяє проникненню основного металу в пори. Такий процес легування можна порівняти з механізмом утворення механічного пригару.

Металостатичний тиск рідкого металу перевищує капілярний (якщо кут змочування більший  $90^\circ$ ) і проникає в пори легуючого покриття. Глибина проникнення розплаву до затвердіння основної його маси тим більше, чим більше розмір пор в покритті і тиск металу та чим менше теплоакумуюча здатність покриття. Якщо кількість тепла, яке надходить від виливки до легуючих покриття, перевищує кількість тепла, яке забирає ливарна форма, то частина легуючого покриття може плавитися і розчинятися та сприятиме подальшому проникненню рідкого металу в покриття. Цей процес буде тривати до тих пір, поки кількість тепла, підведена до межі розділу «легуюче покриття – основний метал» не врівноважиться або зменшиться, ніж кількість тепла, що може відвести форма від цього контакту. Рідкий метал в порах легуючого покриття почне взаємодіяти з зернами покриття і розчиняти їх. У цьому випадку велика роль у вирівнюванні хімічного складу по перетину легованого шару відводиться дифузійним процесам, величиною зерна і пористості легуючого покриття.

Таким чином, в тих випадках, коли для легуючого покриття використовують компоненти, температура плавлення яких нижче або вище температури кристалізації основного металу виливки, процес легування здійснюється або в результаті розплавлення покриття, або в результаті проникнення основного металу в пори легуючого покриття з подальшим його розчиненням внаслідок протікання дифузійних процесів. У тих випадках, коли необхідно використовувати механічні суміші на основі компонентів з різною температурою плавлення, бу-

дуть одночасно здійснюватися обидва процеси. Все залежить від температури перегрівання розплаву, що заливається в форму і різниці температур плавлення покриття і основного металу.

### 3.5 Висновки до розділу

1. Установлено, що для виготовлення виливків із зносостійким поверхневим шаром доцільно використовувати порошки високовуглецевого феромарганцю, чистого марганцю або їх суміші. З додаванням в них хрому, титану бору та інші карбідоутворювальні елементи.
2. Для зносостійкого поверхневого легування з економічної точки зору краще використовувати більш дешевий високо вуглецевий феромарганець, що забезпечує стабільність процесу поверхневого легування і сприяє утворенню надійного легованого шару значної товщини.
3. При дослідженні гранулометричного складу зносостійкого покриття встановлено, що найкращі показники, а саме товщина легованого шару та його рівномірність можна отримати за використання фракції феросплавів 0315 та 04.
4. Для досягнення максимальної твердості поверхні, а разом із нею і зносостійкості виробу або його окремих частин доцільно використовувати розроблені механічні суміші для зносостійкого поверхневого легування, перш за все із вивчених легувальне покриття №4 товщиною до 5 мм, яку можна одержати в умовах виробництва нанесенням на поверхні форм і стрижнів за допомогою пульверизатора (Додаток Б).
5. При дослідженні процесів зносостійкого поверхневого легування отримана легована поверхня, яка має зносостійкість з 2,5 рази більшу ніж метал основи

## РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЖАРОСТІЙКОГО ПОВЕРХНЕВОГО  
ЛЕГУВАННЯ ВИЛИВКІВ**4.1. Дослідження процесу поверхневого жаростійкого легування порошками окремих компонентів**

Незважаючи на великі відомості по застосуванню поверхневого легування для підвищення зносостійкості литих деталей, питання про жаростійкого поверхневого легування залишається маловивченим.

Так як для зносостійкого легування найчастіше застосовуються порошки окремих легуючих матеріалів або їх суміші, доцільно встановити можливість застосування сумішей для жаростійкого поверхневого легування виливків.

В якості вихідних матеріалів для дослідження процесів жаростійкого поверхневого легування обрані порошки ферохрому фракції 01 і алюмінію марки А85 фракції 50 мкм, так як хром і алюміній в найбільшій мірі сприяють підвищенню окалинотійкості сплавів на основі заліза.

Хром відноситься до елементів, які утворюють з залізом безперервний ряд розчинів та складні карбіди. За літературними даними хром може суттєво підвищувати твердість легуваного шару [105].

Оскільки промисловістю випускається велика гама ферохромів з різним вмістом вуглецю, а значить і з різною температурою плавлення, в роботі використані як наповнювачі легувального покриття високовуглецевий ферохром ФХ800А і низьковуглецевий – ФХ015А.

Легуючі склади наносилися на поверхню форми пензлем (в кілька прийомів до товщини 5 мм. В якості сполучного для легуючого покриття застосовували розчин розчини рідкого скла і лігносульфонату технічного.

Аналогічно, як і з феромарганцем теоретичний і практичний інтерес представляють дослідження кривих охолоджень не дорогих феросплавів з метою визначити можливість їх використання для поверхневого легування [105]. Для експерименту обраний стрижень, на який нанесли покриття товщиною 5



мм. Термопары ВР 5/20 з кварцовими наконечниками встановлювали в точках зазначених на рис. 2.5. Результати досліджень показано на рис. 4.1. та рис. 4.2.

Аналізом кривих охолодження встановлено, що використання даних феросплавів доцільно для поверхневого легування. Для всіх компонентів очевидне їх розплавлення під дією температури розплаву, оскільки їх температури плавлення значно нижча за температуру плавлення заліза. Розплавлення легуючих покриттів підтверджено візуальним аналізом отриманих зразків. У відповідності до змісту вуглецю температура плавлення ферохрому: 1580 °С – ФХ800А і 1620 °С – ФХ015А. Аналіз кривих охолодження підтверджує попередні дані авторів роботи [73] щодо товщини легованого шару від матеріалу покриття в залежності від температури плавлення покриття.

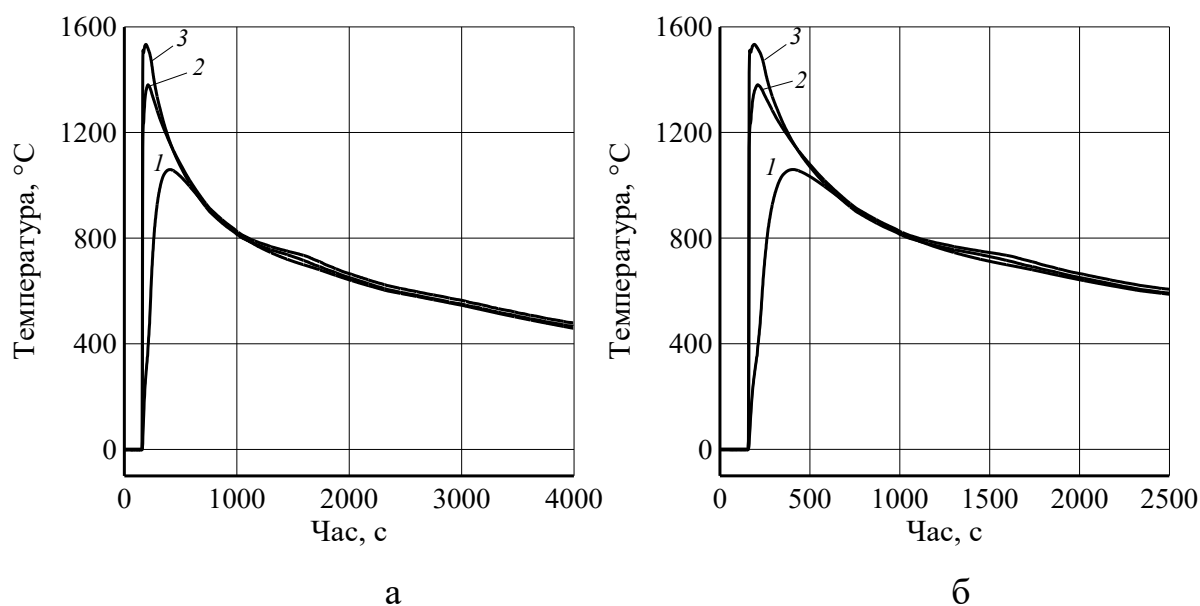


Рис. 4.1. Криві охолодження: а – ФХ800А; б – ФХ015А: 1 – нижня межа покриття - стрижень; 2 – середина покриття; 3 – верхня межа покриття - рідкий метал

Досліджено вплив ферохрому ФХ800А та первинного алюмінію А85 різних фракцій на товщину легованого шару. Виходячи із виробничих можливостей в усіх досліджах використовували легувальне покриття товщиною 3 мм. Результати таких досліджень наведені на рис. 4.3.

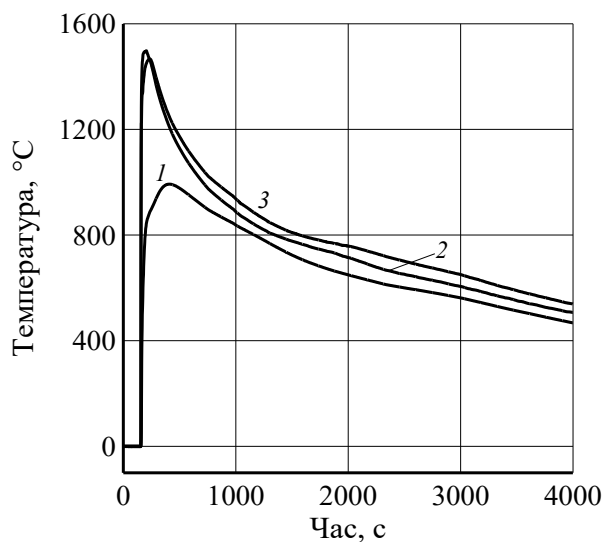


Рис. 4.2. Криві охолодження: А85: 1 – нижня межа знизу покриття – стрижень; 2 – середина покриття; 3 – верхня межа покриття – рідкий метал

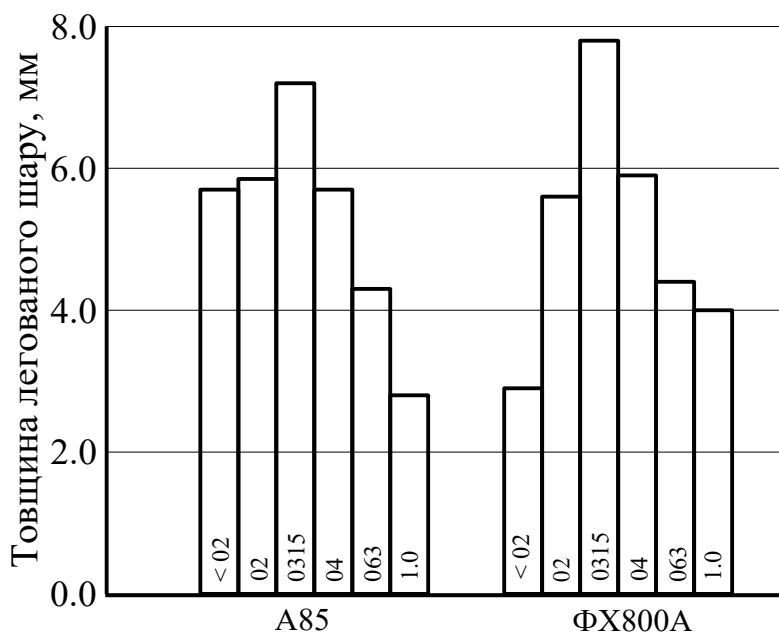


Рис. 4.3. Зміна товщини легованого шару залежно від фракції наповнювача легувального покриття різного складу

Установлено, що за використання високовуглецевого ферохрому можна одержати на поверхні виробу легований жаростійкий шар товщиною до 8 мм (див. рис. 4.3), що повною мірою задовольняє вимоги користувачів жаростійкої продукції. Крім того, наявність вуглецю сприяє утворенню карбідів в легованому шарі, що суттєво підвищує його твердість і зносостійкість.

Інтерес представляє дослідження сумішей жаростійких покриттів на основі ферохрому та алюмінію.

Склад легуючого покриття наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1.

Склади легуючих покриттів і результати дослідження їх ефективності

Індекс покриття	Склад легуючого покриття, % по об'єму		Товщина легуючого шару, мм
	Алюмінієвий порошок А85	Порошок ферохрому ФХ800А	
1	—	100	1,970
2	30	70	0,904
3	50	50	0,090
4	70	30	0,538
5	100	—	5,500

Результати досліджень впливу легуючих покриттів на товщину поверхневолегованого шару наведені в табл. 4.1, рис.4.4. Температура заливання форм – 1620 °С.

Встановлено, що зміна вмісту алюмінію в легуючому покритті суттєво впливає на товщину легованого шару. При підвищенні його в покритті від нуля до 50% за обсягом товщина легованого шару зменшується в багато разів. При невеликому вмісті алюмінію в покритті основу становить порівняно тугоплавкий порошок ферохрому і поверхневе легування проходить, по видимому, внаслідок капілярного проникнення рідкого металу в пори легуючого покриття. Однак, з огляду на те, що пори покриття заповнені дрібнодисперсним порошком алюмінію, який перешкоджає проникненню в них металу, має меншу температуру плавлення, ніж хром, і забирає значну кількість тепла, товщина легованого шару зменшується і досягає мінімуму при співвідношенні хрому і алюмінію 50:50 % за об'ємом.

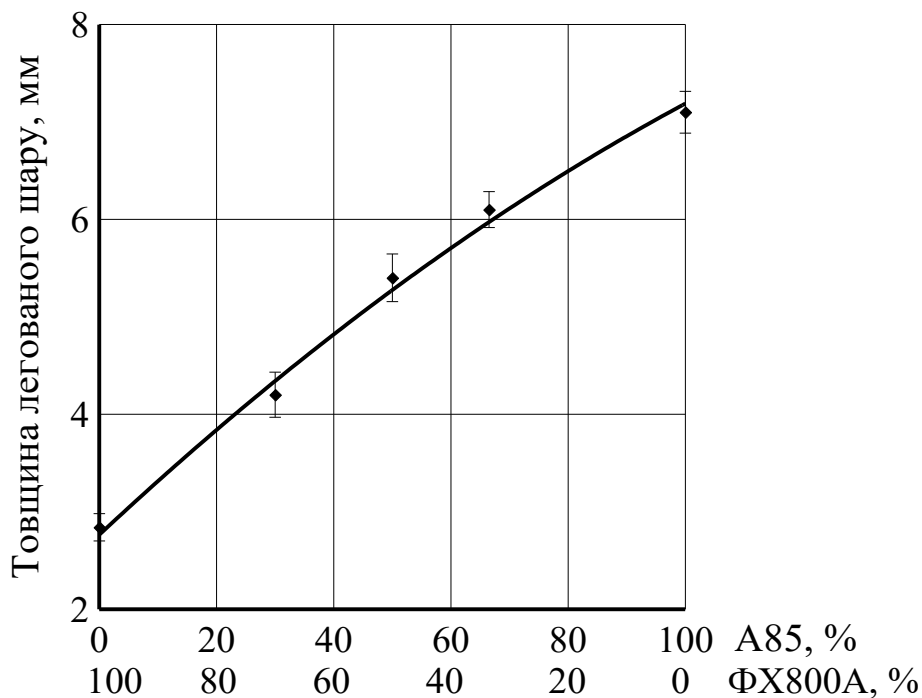


Рис. 4.4. Вплив алюмінію на товщину поверхнево-легованого шару

Дослідженнями впливу механічної суміші ферохрому та алюмінію на утворення легованого шару встановлено, що за будь-якого вмісту цих компонентів утворюється шар задовільної товщини (див. рис. 4.4). Отже, залежно від необхідної товщини легованого шару та терміну експлуатації виробу, можна скористатися відповідним співвідношенням.

Оскільки в роботі розглядаються можливості заміни об'ємного легування металу під час виготовлення жаростійких деталей для теплоенергетики, які працюють не тільки в умовах високих температур, а й високого зносу, поверхневим легуванням у ливарній формі, теоретичний і практичний інтерес представляють дослідження щодо впливу вибраних елементів на товщину та твердість легованого шару. Результати досліджень показано на рис. 4.5.

Як і для попередніх елементів (марганцю і титану) зміна твердості легованого шару здійснюється за такими ж законами. Різниця полягає тільки в тому, що ферохром ФХ800А має меншу температуру плавлення, тому більше розчиняється в рідкому металі основи і сприяє підвищенню твердості: для ФХ800А максимальна твердість складає 64HRA, а для ФХ015А – 56HRA, хоча для

ФХ015А максимум твердості зсувається вправо у порівнянні з ФХ800А (див. рис. 4.5) [100, 105].

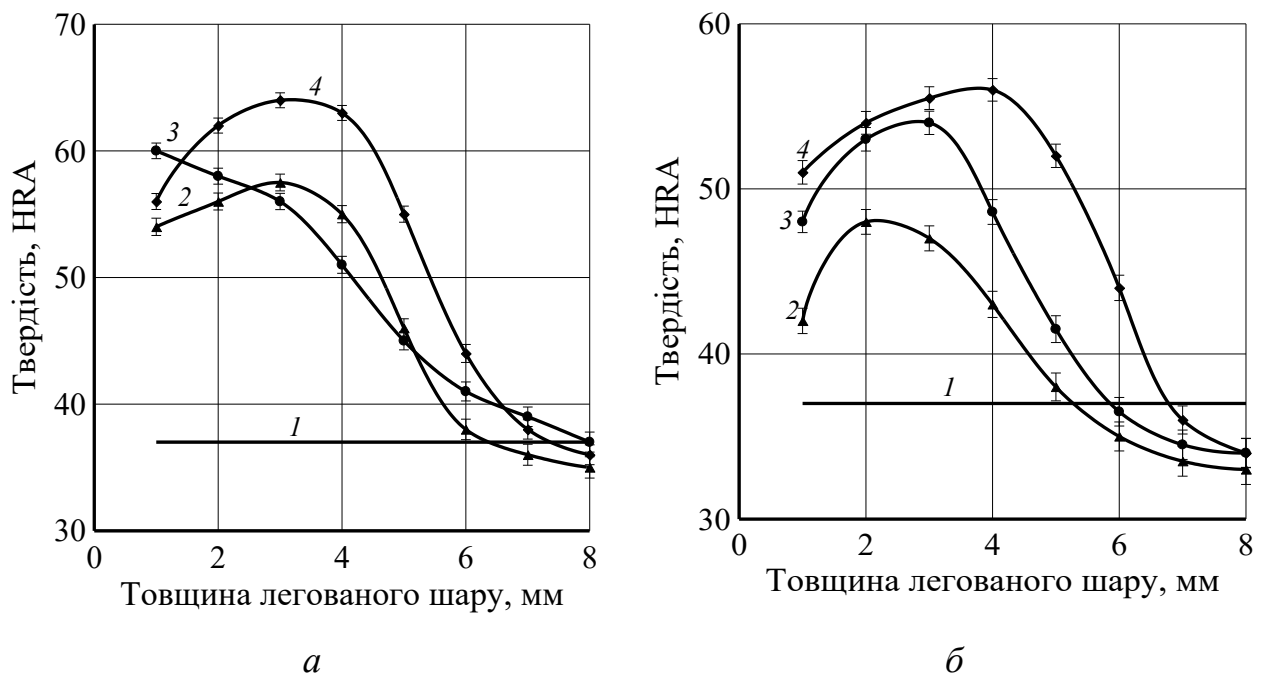


Рис. 4.5. Зміна твердості легованого шару по його товщині в залежності від фракції : ФХ800А (а), ФХ15А (б)

1 – твердість основи; 2 – фракція 04; 3 – фракція 02; 4 – фракція 0315

Така незначна різниця в твердості та товщині легованого шару дає можливість зробити висновок, що як наповнювачі легувального покриття можна використовувати як високо- так і низьковуглецеві ферохроми. Особливо це стосується механічних сумішей. Проте, з точки зору приготування порошків доцільніше використовувати високовуглецеві ферохроми, оскільки вони краще піддаються подрібненню.

Дослідженням структур встановлено, що в усіх випадках утворюється перехідний шар, який забезпечує міцний зв'язок основи з жаростійким легованим шаром (рис.4.6).

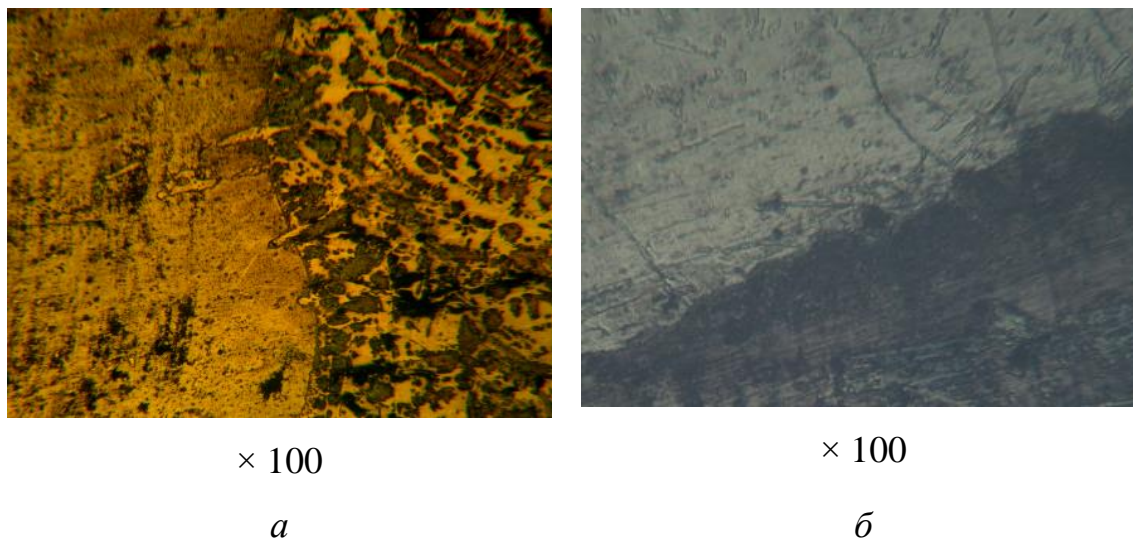


Рис. 4.6. Вплив ФХ800А (а) та А85 (б) на утворення перехідного шару в структурі металу

Дослідження мікро твердості легованого шару показують, що розподіл хрому і його сполук неоднаковий (рис. 4.7). Максимальна мікро твердість досягається в самому поверхневому шарі, що свідчить про наявність зони з великою концентрацією хрому і його сполук. В середині шару коливання мікро твердості значно менше (див. рис. 4.7, крива 2), ніж в поверхневому шарі, що свідчить про рівномірний розподіл легуючих елементів в обсязі матриці-основи металу.

Мікроструктура легованого шару біля зовнішньої границі представляє собою частинки ферохрому, в проміжках яких знаходяться легований алюмінієм і хромом ферит. Структура поверхнево-легованого шару гетерогенна.

При підвищенні вмісту алюмінію в легуючих покритті більше 50% за обсягом, товщина легованого шару збільшується і досягає максимуму (5500 мкм) при утриманні алюмінію 100% за обсягом.

Механізм поверхневого легування в цьому випадку полягає, по-видимому, в інтенсивному розплавленні алюмінію, змішуванні його з основою металу і оточенні частинок ферохрому при одночасному протіканні дифузійних процесів. Розподіл хрому в поверхневому шарі при цьому більш рівномірний (рис.4.8), структура близька до гомогенної.

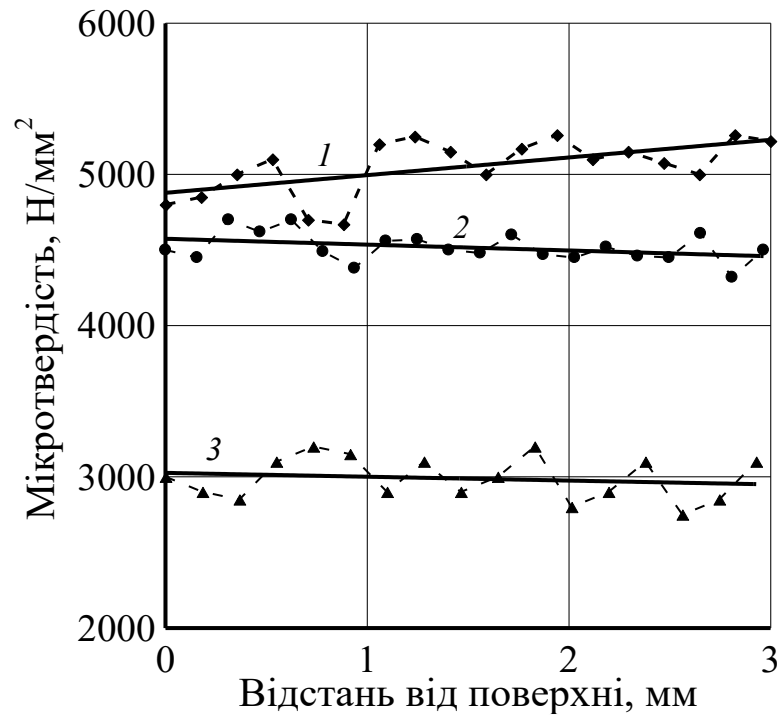


Рис. 4.7. Мікро твердість легованого шару (70% ΦХ800А і 30% А85):

1 – на межі стрижень-покриття; 2 – в середині шару; 3 – на межі поділу шар-основний метал

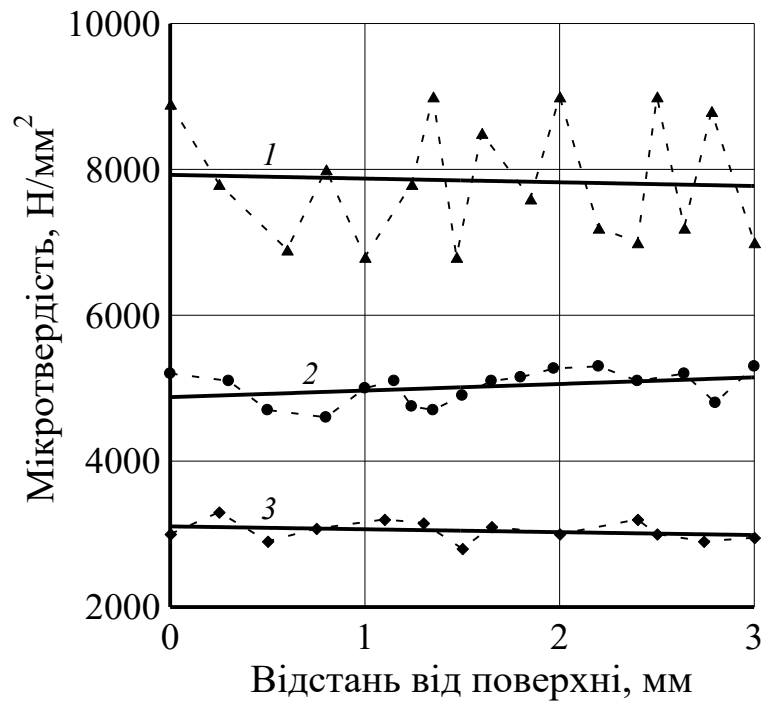


Рис. 4.8. Мікро твердість легованого шару (30% ΦХ800А і 70% А85 – 1):

1 – на межі поділу стрижень – легований шар; 2 – в середині шару; 3 – на межі поділу шар – основний метал

Застосування легуючих покриттів, що складаються з окремих порошків (алюмінію або ферохрому), сприяє отриманню легованого шару максимальної та однакової товщини. Мікротвердість поверхневого шару при цьому стабільна (рис. 4.9) [97].

При використанні чистого порошку алюмінію температури і тепловмісту рідкої сталі досить для розплавлення легуючого покриття на всю товщину, тому максимальний вміст алюмінію в фериті досягається в поверхневому шарі, про що свідчать значення мікро твердості (див. Рис. 4.9, а).

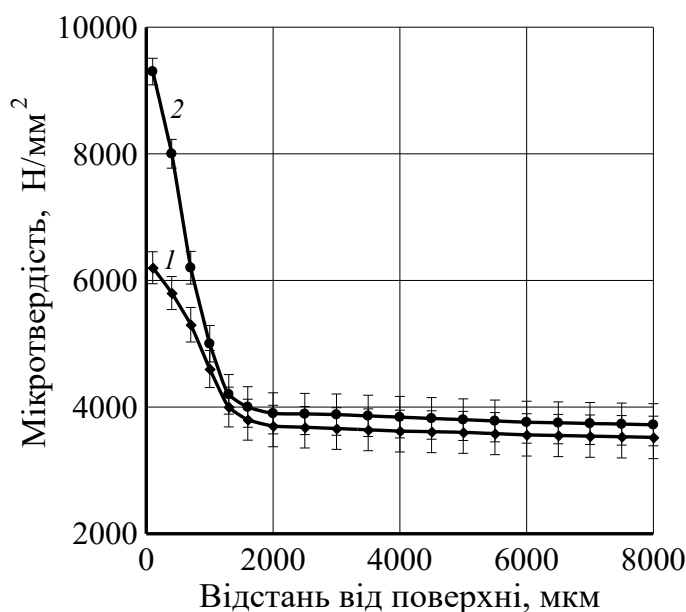


Рис.4.9. Зміна мікротвердості легованого шару, отриманого при використанні покриття на основі алюмінію (а), ферохрому (б)

Аналогічний механізм утворення легованого шару спостерігається, мабуть, і при використанні в якості основи легуючого покриття ферохрому. Однак, в цьому випадку температури і тепловмісту рідкої сталі недостатньо для розплавлення покриття на всю глибину, тому і товщина легованого шару менше (див. Рис. 4.9). Легуючі покриття при цьому розплавляється на глибину 1,5 ... 2,0 мм, інша його частина спікається і сколюється при вибиванні відливок. Це призводить також до утворення нерівній поверхні виливки в місцях її поверхневого легування.

Структура легованого шару в цьому випадку представляє собою легований хромом ферит з поступовим зменшенням концентрації хрому від зовніш-



ньої межі легованого шару до поверхні розділу шар-основний метал, про що свідчить зміна мікро твердості (рис. 4.9, а).

Таблиця 4.2.

Окалиностійкість легованих шарів

Індекс покриття	Склад легованого покриття, % по об'єму		Збільшення маси, $\text{мг}/\text{см}^2$ , при витримці, ч	
	A85	ФХ800А	10	100
0	—	—	6,50	56,00
1	—	100	1,20	5,80
2	30	70	0,37	3,60
3	50	50	0,33	2,70
4	70	30	0,32	2,40
5	100	—	0,30	2,20

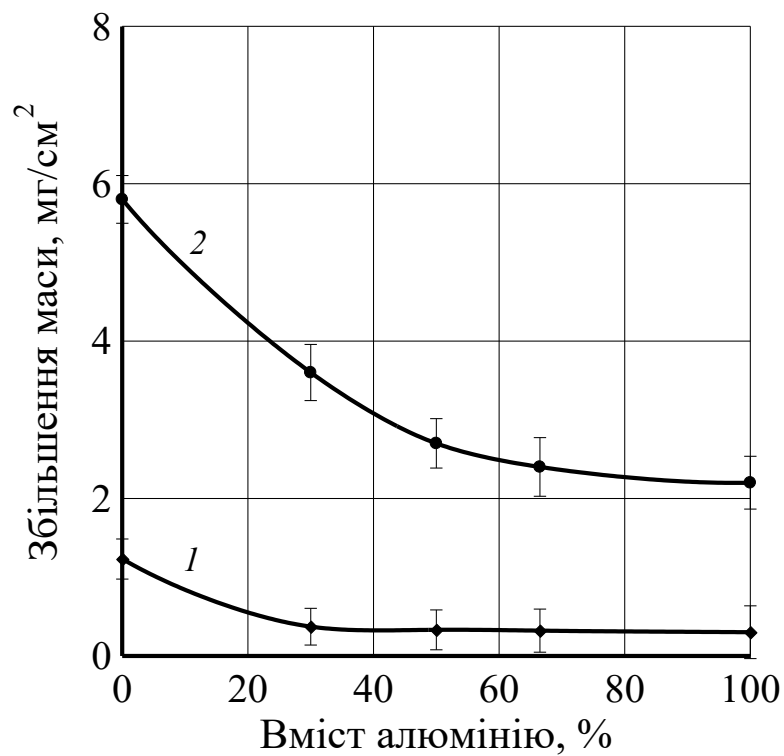


Рис. 4.10. Зміна окалиностійкості легованого шару в залежності від вмісту алюмінію в легуючих покритті:

а – витримка при 1000 °С протягом 10 годин; б – витримка при 1000 °С протягом 100 годин

Дослідженнями окалинотійкості легованого шару табл. 4.2 та рис. 4.10 встановлено, що за використання алюмінію та ферохрому в легувальному покритті окалинотійкість його майже в двадцять разів вища в порівнянні з окалинотійкістю вуглецевої сталі. Високу окалинотійкість легованого шару можна пояснити утворенням на його поверхні оксидів алюмінію  $\text{Al}_2\text{O}_3$  та хрому  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (рис. 4.11), які мають високу щільність і захищають поверхню виробу від проникнення до неї окиснювачів.

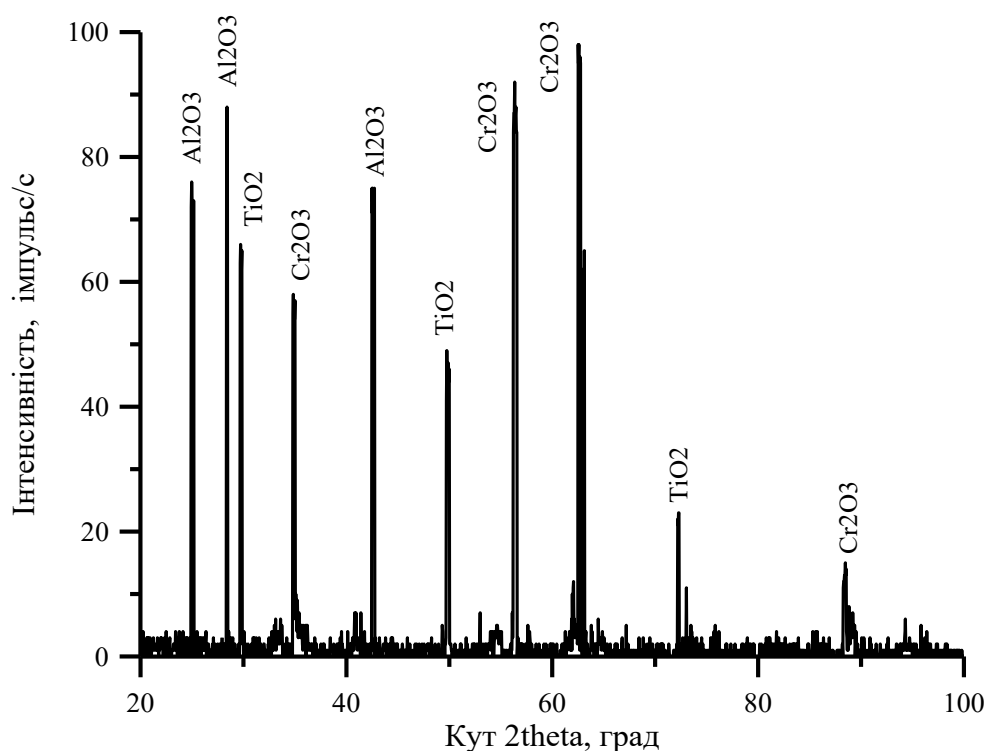


Рис. 4.11. Склад окалини, утвореної на поверхні легованого шару після експлуатації виробу 100 год за 1100 °С (склад легувального покриття – 40% алюмінію + 60% ферохрому ФХ800А)

Як видно з окалинотійкості легованого шару на порядок вище окалинотійкості вуглецевої сталі. Це підтверджує можливість і доцільність процесу поверхневого легування. Кращими захисними властивостями володіє легований шар, отриманий при нанесенні легуючого покриття на основі ферохрому, так як утворюється на поверхні зразка при високих температурах окісна плівка  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  є більш щільною і важче відшаровується від поверхні. Добавки алюмінію викли-

кають утворення комплексної плівки, до складу якої входять оксиди  $Al_2O_3$  володіють меншою здатністю до утримування поверхні зразка і можуть періодично відшаровуватися від поверхні, даючи можливість утворюватися новим оксидів алюмінію [105].

Таким чином, легований шар, отриманий при нанесенні легуючого покриття на основі хрому, має досить високу окалинотійкість, але має обмежену товщину. Виливки таким легованим шаром можуть використовуватися для роботи при температурах до 1100 °C [105].

Легуючі покриття на основі порошку алюмінію забезпечує отримання легового шару достатньої товщини з рівномірним розподілом легуючого елемента, однак окалинотійкість такого шару нижче, хоча і залишається високою. Тому виливки з таким легованим шаром можуть довго працювати лише при температурах до 900 °C [105].

Легуючі покриття на основі хрому та алюмінію не забезпечують отримання легового шару достатньої для експлуатації та високих температурах товщини з рівномірним розподілом в ньому легуючих елементів.

Отже, необхідні дослідження щодо впливу на товщину поверхнево легового шару інших співвідношень хрому і алюмінію, інших складів покриттів, фракцій вихідних матеріалів, особливу нанесення і товщини легуючих покриттів, температурних режимів заливки і охолодження.

#### **4.2. Поверхнєве легування із застосуванням легуючого покриття на основі лігатури хром-алюміній-залізо**

Як зазначалося вище, механічні суміші порошків алюмінію та ферохрому не дозволяють отримати легований шар достатньої товщини з рівномірно розподіленими елементами.

Досліджено вплив легуючого покриття на основі лігатури хром-алюміній-залізо складу 66% хрому, 15% алюмінію, 1% кремнію інше залізо на процес утворення легового шару при цьому використовувався метод вставок – про-

становка в форму пластин товщиною 5 мм, виготовлених з лігатури фракцій 01 і 0315 у співвідношенні 1:1.

Вибір гранулометричного складу лігатури обумовлений прагненням отримати легуючих покриття, що має, з одного боку, розмір пір, достатній для вільного проникнення в них рідкого металу, а з іншого боку, розміри частинок порошку, що забезпечують їх ефективне розплавлення. В якості сполучного при цьому застосовували рідке скло  $M = 2,5$  густиною  $1480 \text{ кг/м}^3$ , розведене водою в співвідношенні 1:1 [105].

Після заливки форм з температури  $1560^\circ\text{C}$  отримано легований шар із середньою товщиною 260 мкм. Розподіл легуючих елементів в легованому шарі рівномірне, про що свідчить мікро твердість шару на різних відстанях від граніти роздала легований шар – основний метал (рис. 4.7). Структура легового шару є легований хромом і алюмінієм ферит з поступовим зменшенням вмісту легуючих елементів до кордону розділу.

Однак товщина легуючого шару недостатня, мабуть, через низьку для цього легуючого покриття температури заливки. Дослідження окалинотійкості легового шару (табл. 4.3) показали досить високу жаростійкість зразків.

Таблиця 4.3.

Окалинотійкість легового шару, отриманий при нанесенні покриття на основі лігатури хром-алюміній-залізо

Температура дослідів, $^\circ\text{C}$	Збільшення маси, $\text{мг/см}^2$ при витримці, год	
	10	100
1200	0,71	-
1000	0,26	1,2
900	0,14	0,8

Окалинотійкість легового шару знаходиться на рівні хромоалюмінієвих сталей.

Тому застосування легуючих покриттів на основі лігатури хром-алюміній-залізо є перспективним для отримання легового шару, що володіє високою окалинотійкістю, але вимагає більш високої температури перегріву металу перед заливкою у форми. Такий метод може бути використаний для

отримання легованого шару на виливках, виготовлених із сталей, що містять знижена кількість хрому (18 ... 20%).

Окремо досліджено зміну товщини легувального покриття залежно від вмісту феросплавів та фракції наповнювача (рис. 4.12 і 4.13).

У процесі математичного оброблення результатів дослідження (табл. 3.1) отримано рівняння для розрахунку прогнозованої товщини легувального покриття залежно від вмісту Cr та Al:

$$z(x,y) = 0.367646 + 0.0188684y + 3.88203e-005y^2 + 0.0729229x + -0.000656189xy$$

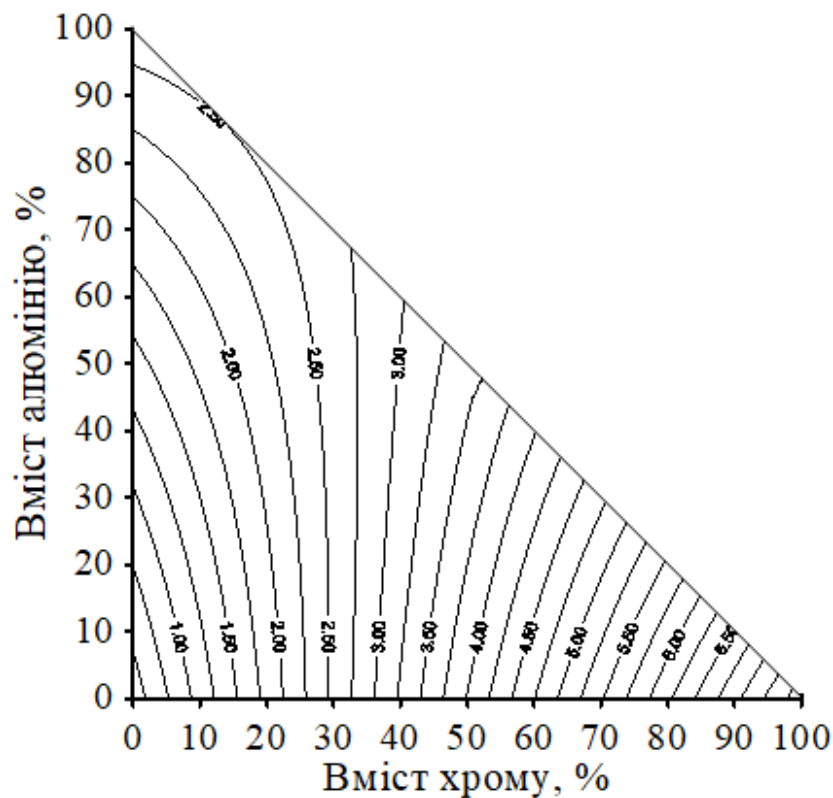


Рис. 4.12. Номограма визначення товщини легувального покриття залежно від вмісту феросплавів

У процесі математичного оброблення результатів дослідження отримано рівняння для розрахунку прогнозованої товщини легувального покриття залежно від фракції наповнювача:

$$z(x,y) = 12.2378 + -2.65692y + -4.92631y^2 + -13.4763x + 6.79607xy + 3.44442x^2$$

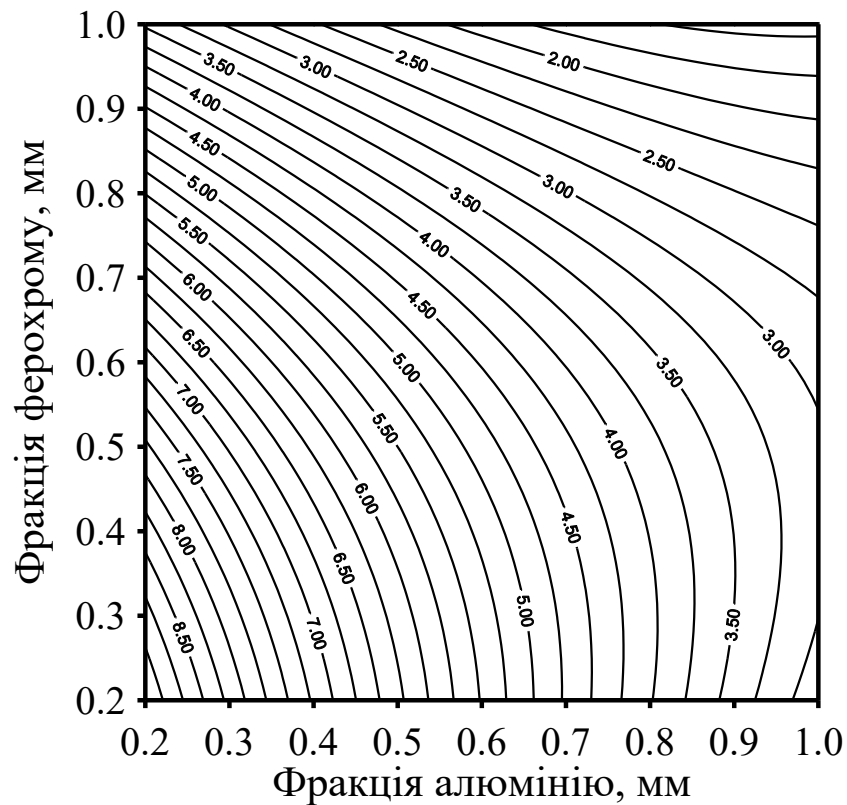


Рис. 4.13. Номограма визначення товщини легувального покриття залежно від фракції наповнювача

Таблиця 4.1

Результати дослідження зміни товщини легувального покриття залежно від вмісту Cr та Al

Вміст Cr	Вміст Al	Товщина легувального покриття
1	2	3
5,0	1,0	12,5
5,0	2,0	10,4
5,0	3,0	8,1
5,0	4,0	5,7
5,0	5,0	2,5
7,5	1,0	10,7
7,5	2,0	8,9
7,5	3,0	7,1
7,5	4,0	4,6
7,5	5,0	2,1
10,0	1,0	8,7

1	2	3
10,0	2,0	6,9
10,0	3,0	5,4
10,0	4,0	3,1
10,0	5,0	1,8
12,5	1,0	7,5
12,5	2,0	6,1
12,5	3,0	5,5
12,5	4,0	3,4
12,5	5,0	1,5
15,0	1,0	5,4
15,0	2,0	4,5
15,0	3,0	3,7
15,0	4,0	2,5
15,0	5,0	1,2

### 4.3 Висновки до розділу

1. Установлено, що для виготовлення виливків з жаростійким поверхневим шаром можна використовувати як окремі компоненти (алюміній, хром), так і їх механічні суміші у відповідному співвідношенні.

2. Даний спосіб виготовлення виливків з диференційованими властивостями поверхні можна використовувати для виробництва жаростійких литих деталей, які працюють в умовах агресивних середовищ за температур до 1100 °С.

3. Побудовано номограми для визначення співвідношення легувальних компонентів у покритті та їх фракцій залежно від необхідної товщини легового шару для забезпечення заданого часу експлуатації литої деталі.

## РОЗДІЛ 5

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗВ'ЯЗУВАЛЬНОГО КОМПОНЕНТУ

Досліджено вплив застосовуваних в якості зв'язуючих компонентів при виготовленні легуючого покриття рідкого скла ( $M = 2,5$ , щільність  $1400 \text{ кг/м}^3$ ) і технічного лігносульфонату (ЛСТ) на товщину і мікротвердість легованого шару. Як легуюче покриття застосовували механічну суміш фракції 0315 складу, описаного і дослідженого вище. Для поліпшення змочуваності компонентів легуючого покриття і зменшення шкідливого впливу на якість металу додатково ЛСТ розводили водою у співвідношенні 1:1, а рідке скло розбавляли до щільності  $1200 \text{ кг/м}^3$ . Інші параметри технологічного процесу залишали без зміни. Результати досліджень показано на рис. 5.1 і 5.2.

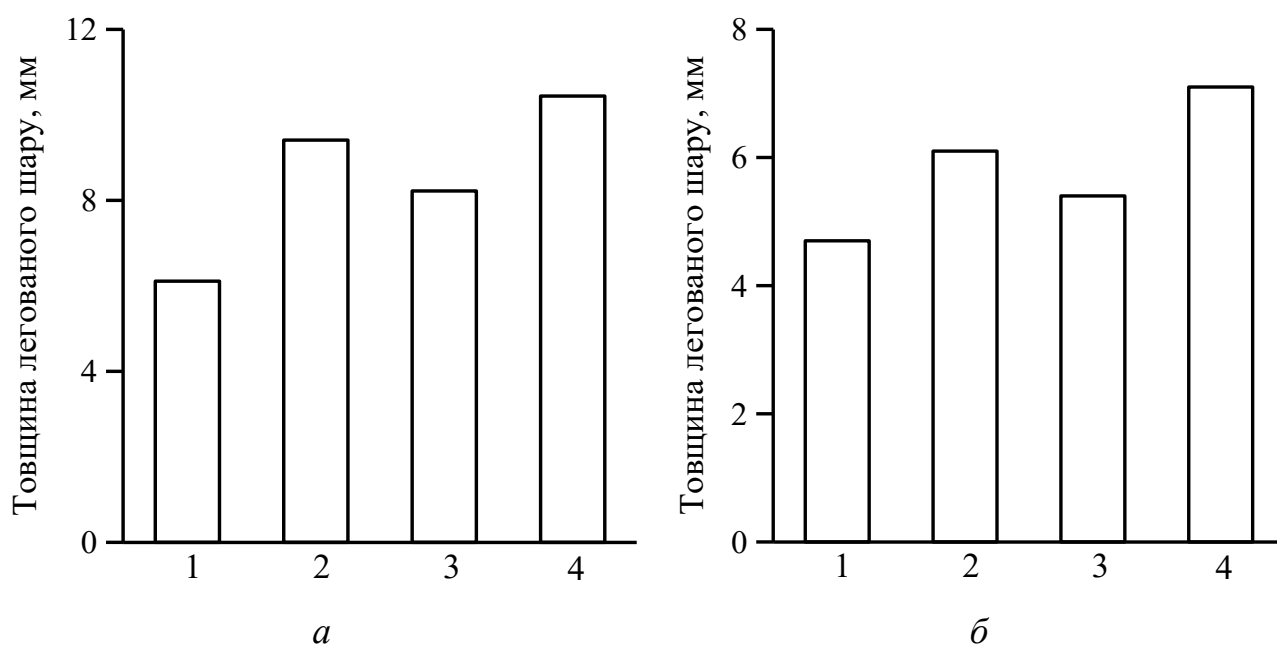


Рис. 5.1. Зміна товщини легованого шару в залежності від типу зв'язувального компонента:

1 – рідке скло; 2 – ЛСТ; 3 – розбавлене рідке скло; 4 – розбавлений ЛСТ

Встановлено, що застосування рідкого скла в якості зв'язувального компонента для легуючих покриттів в стані поставки недоцільно, оскільки товщина легованого шару при інших рівних умовах найменша (див. рис. 5.1). Крім того, продукти термодеструкції рідкого скла надають легованому шару досить шорс-



тку поверхню, а утворення склоподібних оболонок навколо частинок легованого покриття зменшує ступінь їх розплавлення під дією розплаву. Це дуже важливо для виробничих умов, де використовувати високу температуру заливки важко.

Для зменшення процесу утворення склоподібних оболонок навколо частинок легованого покриття, поліпшення умов їх розплавлення під дією залитого розплаву і збільшення товщини легованого шару необхідно розбавляти рідке скло водою до щільності  $1200 \text{ г/см}^3$ . Як видно з результатів (див. рис. 5.1) таке рішення сприяє збільшенню товщини легованого шару до 8 мм, що цілком достатньо для роботи деталей в умовах зносу [101].

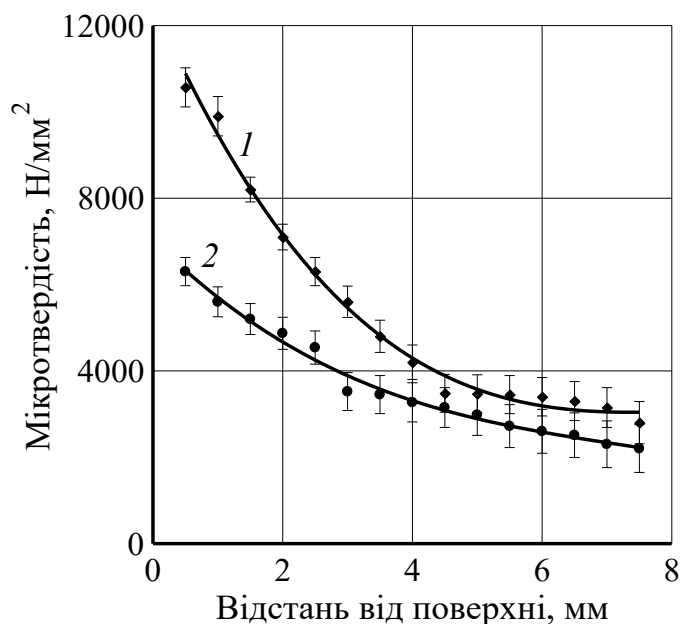


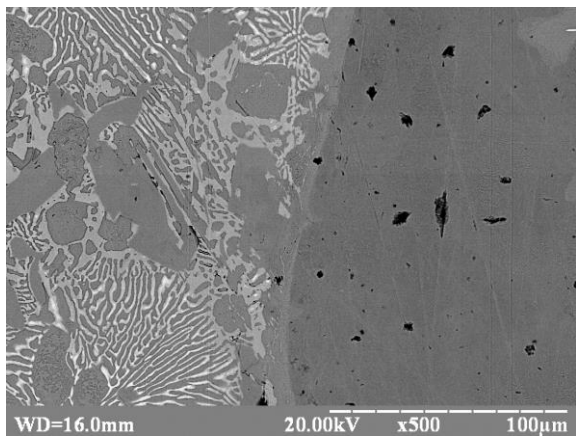
Рис. 5.2. Зміна мікротвердості легованого шару по товщині залежно від типу сполучного компонента: 1 – розбавлений ЛСТ; 2 – розбавлене рідке скло

При застосуванні в якості сполучного технічного лігносульфонату важливу роль відіграє процес газоутворення. Утворені гази створюють на кордоні розділу «легуєче покриття - рідкий метал» протитиск і перешкоджають проникненню розплаву в пори покриття. Кращі результати (максимальна товщина легованого шару (див. рис. 5.1) і високу його якість) отримані після розведення ЛСТ водою в співвідношенні 1:1.

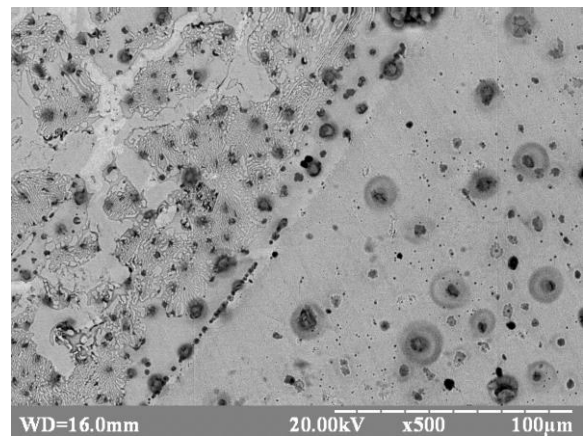
Таким чином, для отримання якісного легованого шару максимальної товщини в якості сполучних компонентів легуєчого покриття необхідно викори-

стовувати розведений технічний лігносульфонат або рідке скло щільністю  $1200 \text{ кг/м}^3$ .

Однак з урахуванням якості перехідного шару така рекомендація вимагає уточнення. Аналізом мікроструктур (рис. 5.3) встановлено, що сполучний компонент істотно впливає на процеси утворення перехідного шару. При використанні рідкого скла щільністю  $1200 \text{ кг/м}^3$  утворюється якісний (див. рис.5.3, а), чистий від раковин і пір шар, який має високу міцність. При використанні розведеного технічного лігносульфонату, що має високу газотвірну здатність, перехідний шар забруднюється продуктами термодеструкції (утворюються газові раковини і пори) і неметалевими включеннями різної морфології (рис. 5.3, б).



а



б

Рис. 5.3. Фрагменти мікроструктур поверхневих шарів литих заготовок після використання рідкого скла (а) і ЛСТ (б)  $\times 400$

При дослідженні індексу забрудненості (рис. 5.4) встановлено, що найбільше забруднюється структура вилівка при використанні ЛСТ, особливо перехідний шар [101].

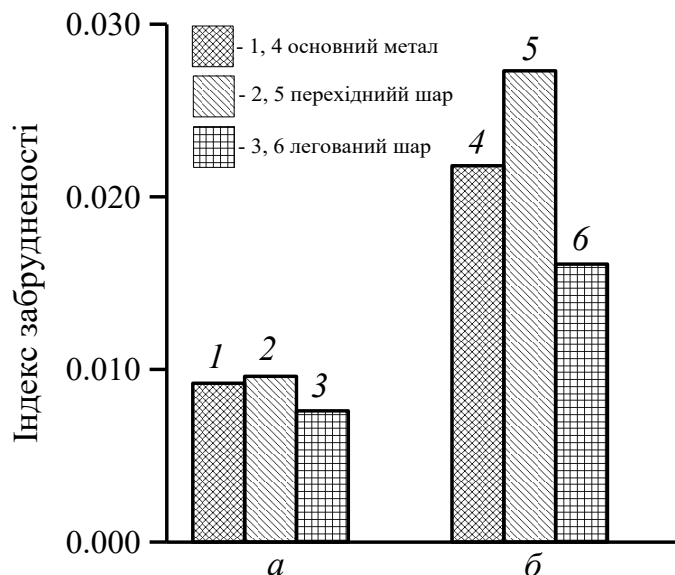


Рис. 5.4. Індекс забрудненості:

а – рідке скло; б – ЛСТ

### Висновки до розділу

1. Таким чином, для отримання якісного легованого шару максимальної товщини в якості зв'язувального компоненту легуючого покриття необхідно використовувати розведений технічний лігносульфонат або рідке скло щільністю  $1200 \text{ кг/м}^3$ .

2. Для отримання виливків з більш чистою від пір та раковин легованою поверхнею необхідно використовувати рідке скло густиною  $1200 \text{ кг/м}^3$ .

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розроблено теоретичні та технологічні принципи виробництва литих деталей з диференційованими властивостями поверхні, що працюють в умовах інтенсивного абразивного зносу, високих температур та агресивних середовищ легуванням металу в ливарній формі.

2. Вивчено процеси поверхневого легування деталей спеціального призначення, розроблено технології та встановлено перспективність використання внутрішньоформового поверхневого легування. Визначено компоненти легувального покриття, їх гранулометричний склад та оптимальні температури розплаву перед заливанням у ливарну форму для одержання легованого шару необхідної товщини та властивостей.

3. Запропонований спосіб поверхневого легування дає змогу одержувати на поверхні виливків легований зносостійкий шар з твердістю до 68 HRA.

4. Для зносостійкого поверхневого легування найекономічнішим є використання дешевого високовуглецевого феромарганцю фракції 02...04, який забезпечує стабільність процесу поверхневого легування та сприяє утворенню надійного легованого шару товщиною до 12 мм.

5. Для підвищення відносної зносостійкості необхідним є використання механічних сумішей феросплавів, співвідношення яких визначається умовами експлуатації виробів.

6. Установлено, що для одержання жаростійкого легованого шару, який може тривалий час працювати за температур до 1100 °С, необхідно використовувати високовуглецевий ферохром та алюміній фракції 0315. Ці параметри процесу повною мірою відповідають вимогам до експлуатації виробів, які працюють в умовах високих температур та агресивних середовищ.

7. Побудовано номограми визначення товщини легувального покриття залежно від вмісту феросплавів і гранулометричного складу наповнювача легувального покриття.

8. Установлено, що найефективнішими зв'язувальними компонентами для легувального покриття є розбавлене рідке скло та розбавлений ЛСТ. Індекс забрудненості легованого шару практично не відрізняється від індексу забрудненості основи металу, а в переважній більшості випадків – нижчий.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Федоров Г.Е., Ямшинский М.М., Платонов Е.А., Лютый Р.В. Стальное литье.: Монография / - К.: НТУУ «КПИ», ПАО «Випол», 2013. – 896 с.
2. Власов В. М. Литая марганцовистая сталь. / В. М. Власов, Е. Ф. Комолова. – М: Машгиз, 1963. – 195 с.
3. Мирзаев Д. А. Влияние металлургических факторов на механические свойства и износостойкость литых марганцовистых сталей / Д. А. Мирзаев, Ю. Д. Корягин, К. Ю. Окишев. // Известия Челябинского Научного Центра. – 1999. – №3. – С. 18–22.
4. Марочник сталей и сплавов / Ю.Г. Драгунов, А.С. Зубченко, Ю.В. Каширский и др. Под общей ред. Ю.Г. Драгунова и А.С. Зубченко - М.: Машиностроение, 2016. 1216 с. (5-е издание)
5. Виробництво виливків із спеціальних сталей: Монографія / Макаревич О.П., Федоров Г.Є., Платонов Є.О. – К.: Видавництво НТУУ “КПІ”, 2005. – 717с.
6. Козловский А. Э. Термическая обработка углеродистых сталей / А. Э. Козловский, М. Ю. Колобов. – Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2017. – 144 с.
7. Власов В. И. Литая высокомарганцевая сталь / В. И. Власов, Е. Ф. Комолова. – М: МАШГИЗ, 1963. – 195 с.
8. ГОСТ 21357-87 «Отливки из хладостойкой и износостойкой стали»
9. ГОСТ 2176-77 «Отливки из высоколегированной стали со специальными свойствами
10. Вороненко В. И. Износостойкие аустенитные высокомарганцевые стали / В. И. Вороненко. // Литейное производство. – 1998. – №1. – С. 19–22.
11. Мулявко Н. М. Анализ эксплуатационной стойкости отливок из стали 110Г13Л / Н. М. Мулявко. // Известия Челябинского научного центра. – 2001. – №4. – С. 28–30.
12. Цуркан Д. А. Повышение конструкционной прочности стали 110Г13Л литых деталей, используемых в специальных машинах, легированием  $\text{Mo}$ ,  $\text{Ni}$  и модифицированием  $\text{rzm}$  / Д. А. Цуркан, А. Н. Леонтьев, А. В. Ишков. // Ползуновский вестник. – 2012. – №1. – С. 334–336.
13. Цуркан Д. А. Управление структурой и свойствами сталей 110Г13Л, 38ХС, 45ХН, используемых для изготовления деталей специальных машин : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.16.09 "Материаловедение" / Цуркан Денис Александрович – Барнаул, 2012. – 18 с.

14. Bolshakov v. i. influence of chemical components on the mechanical properties of steel 110g13l / V. I. Bolshakov, O. P. Yushkevich, O. P. Nosenko. // Строительство, материаловедение, машиностроение: Стародубовские чтения. – 2015. – №1. – С. 98–104.
15. Большаков В. И., Юшкевич О. П. Определение и сравнение уровней вклада химических компонентов в комплекс механических свойств стали 110Г13Л//Металлургическая и горнорудная промышленность: Научно-технич. и производств. журнал.- Дн-вск, 2013. - № 6 - С. 34-38.
16. Триботехнические свойства высокохромистых сплавов в литом и термообработанном состоянии / М. В. Киндрачук, В. З. Куцова, М. А. Ковзель та ін. // Проблеми трибології. – 2012. – №2. – С. 58–63.
17. <http://worldcat.org/identities/lccn-n79068121/>
18. Ефременко В. Г. Развитие теоретических и технологических основ производства и упрочнения стальных мелющих шаров с целью повышения их качества и эксплуатационной долговечности. – Автореф. дисс. докт. техн. наук. – Мариуполь, 2005. – 43 с.
19. Бобырь С. В. Применение новых марганцовистых чугунов для изготовления деталей промышленного оборудования / С. В. Бобырь, В. И. Большаков. // Институт черной металлургии. – 2009. – №1. – С. 18–23.
20. Богодухов С. И. Термическая обработка износостойких чугунов / С. И. Богодухов, И. Ш. Тавтилов, Нгуен Хоанг Линь. // Интеллект. Инновации. инвестиции. – 2017. – №6. – С. 71–77.
21. Термическая обработка отливок из белого износостойкого чугуна / Д. А. Мирзаев, Ю. Д. Корягин, А. А. Куликов, А. С. Созыкина. // Металлургия. – 2013. – №2. – С. 287–292.
22. Лютый В.А. Хромоалюминиевая сталь для отливок, работающих при переменных температурах до 1200 °С. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.16.04. – К.: КПИ, 1969. – 320 с.
23. Химушин Ф.Ф. Нержавеющие стали. – М.: Металлургия, 1963. – 600 с.,
24. Щедров К.П., Гакман Э.П. Жаростойкие материалы. – М.-Л.: Машиностроение, 1965. – 166 с.
25. Козлова Н.Н. Жаростойкая сталь. А.с. СССР, Кл.С22с 39/20 №423876, зая-вл. 17.07.72. Оpubл. 05.09.74, Бюл. №11. – 3 с.
26. Тавадзе Ф.Н. Жаростойкая сталь. А.с. СССР, Кл.С22с 39/26 №393353, зая-вл. 09.08.71. Оpubл. 27.12.73, Бюл. №12 2 с.]
27. Ланская К. А. Высокохромистые жаропрочные стали / К. А. Ланская. – М: Металлургия, 1976. – 216 с.

28. Мarmorштейн Л.В. Сплавы железо-хром-алюминий. – М.: Металлургиздат, 1950. – 120 с.
29. Ямшинский М. М. Литейные и механические свойства жаростойких сталей / М. М. Ямшинский, Г. Е. Федоров, Е. А. Платонов. // Литейное производство. – 2013. – №4. – С. 65–69.
30. Лютый В.А., Платонов Е.А., Федоров Г.Е, Кузьменко А.Е. Хромоалюминиевые стали для изготовления жаростойких деталей теплоэнергооборудования // Литейное производство. – 2001. – №4. – С. 13...15.
31. Корнилов И.И. Жароупорный сплав №3. – М.: Изд-во АН СССР, 1947. – 120 с.
32. Гудремон Э. Специальные стали. Т.1. – М.: Металлургия, 1966. – 736 с.
33. Эмингер З., Вебер К. Производство отливок из специальных сталей. – М.: Машгиз, 1960. – 141 с.
34. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали. – М.: МИСиС, 1999. – 480 с.
35. Никулин С. А. Материаловедение. Специальные стали и сплавы / С. А. Никулин. – М.: МИСиС, 2013. – 123 с.
36. Золоторевский В. С. Металловедение. Том 2. Термическая обработка. Сплавы / В. С. Золоторевский. – М.: МИСиС, 2014. – 528 с.
37. Зеликман А. Н. Вольфрам / А. Н. Зеликман, Л. С. Никитина. – М.: Металлургия, 1978. – 272 с.
38. Зоткин В. Е. СПЕЦИАЛЬНЫЕ СТАЛИ И СПЛАВЫ / В. Е. Зоткин, Н. Н. Литвинова. – Челябинск: ЮУрГУ, 2015. – 72 с.
39. СПЕЦИАЛЬНЫЕ СТАЛИ / Е. В. Братковский, А. В. Заводяный, А. Н. Шаповалов, Е. А. Шевченко. – Новотроицк: МИСиС, 2013. – 87 с.
40. Меськин, В.С. Основы легирования стали / В.С.Меськин. – М.: Металлургиздат, 1959. – 688 с. (2-изд.: М.: Металлургия, 1964. – 684 с.)
41. Браун М. П. Влияние легирующих элементов на свойства стали / М. П. Браун. – Киев: Гостехиздат УССР, 1962. – 192 с.
42. Особенности и физические принципы влияния добавок кремния на свойства стали / А. Н.Маковецкий, Д. А. Мирзаев, А. А. Мирзоев, К. Ю. Окишев. // Вестник ЮУрГУ. – 2017. – №4. – С. 38–48.
43. Петропавловская Т. А. Легированные стали / Т. А. Петропавловская, В. Д. Кудрявцева, В. И. Кондращенко. – М.: МИИТ, 2009. – 50 с.
44. Бобро Ю.Г. Легированные чугуны. – М.-К.: Металлургия, 1976. – 288 с.

45. Мельникова А. Я. Алюминий в сталях, и его влияние на структуру и свойства сталей / А. Я. Мельникова, Л. Р. Гулемова. // Доклады Башкирского университета.. – 2018. – №1. – С. 58–63.
46. Кинцел А.Б., Русел Френкс. Высокохромистые нержавеющие и жароупорные стали. – М.: Металлургиздат, 1945. – 473 с.
47. Приданцев М.В., Ланская К.А. Стали для котлостроения. – М.: Металлургиздат, 1959. – 303 с.
48. Корнилов И.И. Железные сплавы. Т.1. – М.: Изд-во АН СССР, 1945. – 192 с.
49. Ващенко К.И., Жук В.Я., Лютый В.А. Безникелевые жаростойкие стали для отливок // Технология и организация производства. – 1969. – №1. – С. 55..58.
50. Ващенко К.И., Жук В.Я., Лютый В.А. Безникелевая жаростойкая сталь для отливок, работающих при переменных температурах до 1200°С // Литейное производство. – 1970. – №4. – С. 28...32.
51. Шульте Ю.А. Повышение трещиностойкости среднеуглеродистой и низколегированной стали // Литейное производство. – 1966. – №9. – С. 41..43.
52. Скок Ю.А. Влияние легирования на хрупкость литых железо-хромистых сплавов // Легирование и хрупкость стали. – К.: УкрНИ-ИНТИ, 1971. – С. 100...107.
53. Ващенко К.И., Ларин В.К. Влияние окисления жидкого металла на содержание неметаллических включений в отливке // Литейное производство. – 1972. – №3. – С. 23...25.
54. Плотинский Л.Е. Исследование условий предупреждения брака по пленам в производстве отливок из легированных сталей. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.16.04 / – М.: 1958. – 20 с.
55. Стали и сплавы для высоких температур: Справ. Изд. В 2-х кн. Кн. 1./ Маслеников С.Б., Масленикова Е.А. М.: Металлургия, 1991, 383 с.
56. Кубашевский О., Гопкинс Б. Окисление металлов и сплавов. М.: ИЛ, 1955,-312 с.
57. Савицкий Е.М. Перспективы исследования и применения РЗМ, сплавов и соединений // Редкоземельные металлы и сплавы. – М.: Наука, 1971. – С. 5...17.
58. Казачков И.П. Легирование стали. – К.: Техніка, 1982. – 120 с.
59. Верховлюк А. М. Кинетические особенности растворения твердых материалов в расплавах на основе железа // Там же. – 2004. – № 3. – с. 10-20.



60. Мысик В. Ф. Металлургия ферросплавов: технологические расчеты : учебное пособие / В. Ф. Мысик, А. В. Жданов, В. А. Павлов. – Екатеринбург: Урал, 2018. – 536 с.
61. Изучение процесса плавления сплавов системы Fe-Ni-Cr в железоуглеродистом расплаве / В. И. Жучков, О. В. Заякин, Д. С. Ренев, Е. Ю. Лозовая. // Инновационно-издательский дом "Бутлеровское наследие". – 2016. – №8. – С. 56–62.
62. Талуц С. Г. Экспериментальное исследование теплофизических свойств переходных металлов и сплавов на основе железа при высоких температурах : дис. докт. физ.-мат. наук : 01.04.14 / Талуц С. Г. – Екатеринбург, 2001. – 38 с
63. Жучков В. И. Растворение ферросплавов в жидком металле / В. И. Жучков, А. С. Носков, А. Л. Завьялов. – Свердловск: УрО АН СССР, 1990. – 134 с.
64. Офенгенден А. М. К вопросу о кинетике растворения в жидкой стали / А. М. Офенгенден, В. А. Явойский. // Теория и технология новых процессов в производстве стали.. – 1968. – №48. – С. 151–155.
65. Купман Л. И. О кинетике растворения ферросплавов в разливочном ковше / Л. И. Купман, В. И. Явойский. // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1964. – №9. – С. 62–65.
66. Пилюшенко В. Л. Научные и технологические основы микролегирования стали / В. Л. Пилюшенко, В. А. Вихлевщук, М. А. Поживаков. – Москва: Металлургия, 1994. – 384 с.
67. Игнатьев В. С. Изучение свойств ферросплавов и лигатур для микролегирования и раскисления стали. / В. С. Игнатьев, В. А. Вихлевщук, В. М. Черногрицкий. // Известия ВУЗов, черная металлургия. – 1988. – №6. – С. 37–42.
68. Вихлевщук В. А. Математическое моделирование процессов внепечной обработки стали / В. А. Вихлевщук, А. П. Огурцов, И. А. Павлюченков. – Киев: ИСМО МО, 1997. – 157 с.
69. Базы данных и модели для экспертной оценки эффективности использования ферросплавов при производстве стали / [Д. Н. Тогобицкая, В. П. Пиптюк, С. В. Петров та ін.]. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2017. – №31. – С. 150–165.
70. Поверхностное легирование стальных отливок / А.А. Горшков, // Москва, государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы. 1950.

71. В.І. Цоцко Легування поверхневого шару ливарної заготовки в процесі лиття/ В.І. Цоцко, Б.Г. Пелешенко, П.І. Мельник // журнал металознавство та обробка металів, 2009 р.
72. П.І. Мельник Сучасні уявлення про механізм дифузійного формування поверхневого шару на залізі: стаття, журнал фізика і хімія твердого тіла Т. 12, № 3 (2011) С. 719-726
73. Тихий В. А. Исследование механизма и разработка технологии процесса поверхностного легирования отливок : дис. канд. / Тихий В. А. – Краматорск, 1975. – 163 с.
74. Дорошенко В. С. Вакуумирование печаной формы: физико-химия, технология и экология / В. С. Дорошенко, К. Х. Бердыев. // Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра. НТУУ «КПІ». – 2014. – №1. – С. 292–311.
75. Мартынюк С. В. Повышение свойств рабочего слоя отливок путем поверхностного легирования нанодисперсными соединениями / С. В. Мартынюк, В. Т. Калинин. // Запорожская торгово-промышленная палата. – 2013. – №1. – С. 137–138.
76. Горшков А. Л. Поверхностное легирование при затвердивании / А. Л. Горшков, А. А. Рабинович. // Литейное производство. – 1957. – №5. – С. 20–24.
77. Кудрявцева Н. Я. Диффузионное поверхностное легирование инструментальных сталей : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.16.01 "Металовединье и термическая обработка" / Кудрявцева Н. Я. – Томск, 1993. – 16 с.
78. Оболенцев Ф.Д., Ясунов В.В., Куринин В.Г. //Получение биметаллических отливок при использовании металлокерамических каркасов.// Информ. Листок ОЦНТИ №86-24. Одеса, 1985. 12с
79. Белинин Д. С. Плазменная поверхностная обработка высоколегированных сталей током обратной полярности / Д. С. Белинин, Ю. Д. Щицын. – 2015. – №4. – С. 28–34.
80. Загорянский В. Г. Обоснование применимости биметалла сталь-алюминий по расчетным критериям противоположной бронестойкости / В. Г. Загорянский. // Вісник НТУУ «КПІ». – 2015. – №3. – С. 37–41.
81. Гурьев, А.М. Новые методы диффузионного термоциклического упрочнения поверхности стальных изделий бором совместно с титаном и хромом / А.М. Гурьев, Б.Д. Лыгденов, С.Г. Иванов, О.А. Власова, И.А. Гармаева, Е.А. Кошелева, М.А. Гурьев // Успехи современного естествознания. - 2007. - № 10. - С. 84-85.
82. Гурьев, А.М. Комплексное диффузионное упрочнение тяжело нагруженных деталей машин и инструмента / М.А. Гурьев, С.Г. Иванов, Е.А. Ко-

шелева, А.Г. Иванов, А.Д. Грешилов, А.М. Гурьев, Б.Д. Лыгденов, Г.А. Околович // Ползуновский вестник. - 2010. - № 1. - С. 114-121.

83. Берг П.П., Гусев В.В. Способ поверхностного легирования чугуновых отливок. Авторское свидетельство 11766 класс 31с (от 12 мая 1958г.)

84. Михайлов А. М. Литейное производство / А. М. Михайлов. – М: Машиностроение, 1987. – 256 с.

85. Вейник А.Н. Термодинамика литейной формы. – М.:Машиностроение, 1968. –174с

86. Волков Ю.А. Определяющие факторы процесса поверхностного легирования отливок. /Сб. Приложение теплофизики в литейном производстве Минск: Наука и Техника,1966.С.18...22.

87. Гурьев, М.А. Технология упрочнения стальных изделий в процессе литья / М.А. Гурьев, Д.С. Фильчаков, С.Г. Иванов, А.М. Гурьев, В.Б. Деев // Литейщик России. - 2013. - № 6. - С. 36-38.

88. Богачев В.М. Грузин В.Г. Легирование поверхности отливок при затвердевании Литейное производство, 1957,№6 С.18...22

89. Степанова Т.Ю. Технологии поверхностного упрочнения деталей машин: учеб. пособие; Иван. гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2009. – 64 с.

90. Клычков В.В. Фурман Е.Д. Тересков Ю.И. Поверхностное упрочнение деталей машин работающих в условиях абразивного изнашивания. Пути упрочнения изделий.– М.:1979,-с.153...158

91. Найдич Ю.В. Контактные явления в металлургических расплавах. К.: Наукова думка, 1972.-180с.

92. Михайлов А.М. Грузин В.Г. Поверхностное легирование фасонных отливок Литейное производство, 1957,№6.С.18...20

93. Оптимизация технологии производства стали с нормируемым содержанием серы / [В. В. Киселенко, В. П. Онищук, Д. А. Дюдкин та ін.]. // Литье и металлургия. – 2004. – №3. С.93...95

94. Омельченко В.Г. Экзотермический процесс поверхностного легирования отливок. Литейное производство, 1965, №6. С.20...22

95. Биметаллические отливки железо-алюминий /К.И. Ващенко, В.В. Жижченко А.Н. Фирстов. – М.: Машиностроение, 1966.-175с.

96. Эллиот Д. Ф. Термохимия сталеплавильных процессов. / Д. Ф. Эллиот, М. Глейзер, В. Рамакришна. – Москва: Металлургия, 1969. – 252 с.

97. Заблоцкий В.К. Особенности абразивного износа комплексных В–Сг–Аl покрытий на углеродистых сталях / В. К. Заблоцкий, Ю. Г. Дьяченко // Восточно-европейский журнал передовых технологий – 2006. – №4/(22). – С. 59-62.

98. Ковальчук А.Г., Ямшинський М.М., Федоров Г.Е. Исследование процессов износостойкого поверхностного легирования // Метал и литье Украины №6-7 (289-290), 2017, С. 28-34.

99. Ямшинський М. М. Поверхнєве легування для виготовлення виливка із диференційованими властивостями / М. М. Ямшинський, М. В. Завертайло. // Матеріалознавство та перспективні технології. – 2011. – №4. – С. 50.

100. A.G. Kovalchuk, M.M. Yamshinskij, G.E. Fedorov, N.V. Yamshinska Differentiated Properties of Metal Products' Surface // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) Vol. 6 Issue 10, October – 2017 pp. 186...194.

101. Ковальчук А.Г., Ямшинський М.М., Федоров Г.Е. Усовершенствование технологических процессов поверхностного легирования заготовок в литейной форме // Метал и литье Украины №8-10 (291-293), 2017, С. 55-63.

102. Ковальчук А.Г., Ямшинський М.М., Федоров Г.Е. Виробництво виливків з диференційованими властивостями поверхні // Наукові вісті НТУУ «КПІ» №6, 2017. С. 74...80 DOI: 10.20535/1810-05 46.2017.6.98850.

103. Ковальчук А.Г., Ямшинский М.М., Федоров Г.Е. Физико-химические процессы в отливках при износостойком поверхностном легировании поверх-ности // Метал и литье Украины №9-10, 2018, С. 38...45.

104. Ковальчук О.Г., Ямшинський М.М., Федоров Г.Є. Поверхнєве легування // Web of Scholar. Multidisciplinary Scientific Journal 6(6), October 2016. P. 23...25.

105. Ковальчук А. Г., Ямшинский М. М., Федоров Г. Е. Исследование процессов жаростойкого поверхностного легирования отливок // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. № 2 (41), 2017. С. 44...50.

## Додаток А Акт впровадження

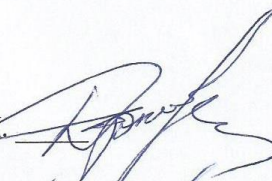
Затверджено  
Директор  
ТДВ «Булат»  
Ковальчук О.В.  
«» 2018р

## Акт

Ми, які підписали, головний інженер Дармограй Б.М. начальник сталеплавильного цеху Бельзецька Г.М., представники НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» Ковальчук О.Г., Ямшинський М.М., склали акт в тому, що 26 вересня 2018 року для виготовлення імпеллера цукрового заводу (560 кг) було використано метод поверхневого легування, який розроблено на кафедрі ливарного виробництва чорних і кольорових металів.


Візуальним контролем встановлено, що робоча поверхня імпеллера має задовільну робочу поверхню. Робоча поверхня виготовлена із зносостійкого матеріалу на основі феромарганцю, ферохрому із додаванням титану, основа імпеллера сталь 30Л.

Така технологія дозволяє отримати економічний ефект 27435 грн на 1 тоні рідкого металу.

Головний інженер Дармограй Б.М. 

Начальник СПЦ Бельзецька Г.М. 

Представник НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» Ковальчук О.Г. 

Представник НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» Ямшинський М.М. 

## Додаток Б Розпилювач для нанесення фарби

